

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta bezpečnostního inženýrství

Katedra bezpečnostního managementu

**Stanovení minimální teploty vznícení v rozvířeném
stavu u vybraných prachů na modifikovaném
přístroji.**

Student: Roman Kaperstein

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Jaroslav Damec CSc.

Studijní obor: Bezpečnostní inženýrství

Datum zadání diplomové práce: 30.11.2009

Termín odevzdání diplomové práce: 30.4.2010

Anotace

KAPERSTEIN, Roman. *Stanovení minimální teploty vznícení v rozvířeném stavu u vybraných prachů na modifikovaném přístroji*. 2010. VŠB-Technická Univerzita Ostrava. Fakulta bezpečnostního inženýrství. Diplomová práce.

Cílem této diplomové práce je stanovit vliv způsobu namáhání vzorku prachu na minimální teplotu vznícení. V teoretické části je popsán mechanismus výbuchu hořlavých prachů a faktory, které ovlivňují výbušnost prachovzduchové směsi. Dále jsou popsány metody měření minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu. V praktické části je uveden síťový rozbor použitých vzorků prachu a výsledky provedených měření. Výsledky měření jsou vyhodnoceny a je provedeno srovnání jednotlivých metod stanovení minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu.

Klíčová slova: vznícení, prach, indukční doba vznícení, minimální teplota vznícení.

Annotation

KAPERSTEIN, Roman. *Determination of Minimum Ignition Temperature of selected Whirled Up Dusts Using a Modified Apparatus*. 2010. VŠB – Technical University of Ostrava. Faculty of Safety Engineering. Diploma thesis.

The main objective of the diploma thesis is to determine the effect of feeding the furnace on minimum ignition temperature. There are basic knowledge about dust explosion mechanism and factors that influence dust explosibility in the theoretical part. The following describes methods of measuring the minimum ignition temperature of whirled up dust. The practical part includes an analysis of the dust samples, the results of measurements and a comparison of different methods of determining the minimum ignition temperature of whirled up dust.

Key words: ignition, dust, inductive time of ignition, minimum ignition temperature.

„Místopřísežně prohlašuji že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně“.

V Ostravě:

.....

Roman Kaperstein

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Jaroslavu Damcovi, CSc. za cenné rady při vedení mé diplomové práce a Ing. Ladislavu Mokošovi za spolupráci a poskytnutí cenných informací.

Obsah

Vysvětlení základních pojmů	3
1 Úvod	4
2 Teoretická část	5
2.1 Výskyt výbuchu prachu	5
2.2 Hořlavé prachy	5
2.3 Mechanismus výbuchu prachu	6
2.4 Podmínky pro průběh výbuchu prachu	7
2.5 Požárně technické charakteristiky prachů	8
2.5.1 Maximální výbuchový tlak	9
2.5.2 Maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku	9
2.5.3 Dolní mez výbušnosti	10
2.5.4 Minimální iniciační energie	11
2.5.5 Teplota vzplanutí, vznícení a žhnutí usazeného prachu	11
2.5.6 Minimální teplota vznícení rozvířeného prachu	11
2.5.7 Mezní koncentrace kyslíku	12
2.5.8 Stanovení náchylnosti k samovznícení	12
2.6 Faktory ovlivňující výbušnost prachu	12
2.6.1 Chemické složení prachu a vlhkost prachu	12
2.6.2 Koncentrace prachu	14
2.6.3 Vliv velikosti částic	15
2.6.4 Koncentrace oxidačního prostředku	16
2.6.5 Vliv teploty	18
2.6.6 Vliv turbulence	18
2.6.7 Počáteční tlak v okamžiku iniciace	19
2.6.8 Přítomnost hořlavých plynů	20
2.6.9 Vliv velikosti objemu	20
2.6.10 Vliv iniciační energie	20
3 Popis měřících metod ke stanovení minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu	21
3.1 Stanovení minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu na zařízení Indoza	21
3.1.1 Konstrukce zkušebního zařízení	21
3.1.2 Průběh zkoušky	23
3.1.3 Výsledek měření	23
3.1.4 Vyhodnocení výsledků	24
3.1.5 Nejistota měření	24
3.2 Měřicí zařízení dle ČSN EN 50 281	24
3.2.1 Konstrukce zkušebního zařízení	25
3.2.2 Průběh zkoušky	26
3.2.3 Nejistota měření	27
3.3 Měřicí zařízení dle ČSN EN 50 281-2-1 po modifikaci	27
3.3.1 Konstrukce zkušebního zařízení	28
3.3.2 Průběh zkoušky	30
3.3.3 Vyhodnocení výsledků	31
3.3.4 Nejistota měření	31
4 Vzorky hořlavých prachů	32
4.1 Síťový rozbor vzorků	32
4.1.1 Vzorek číslo 1 Novopassit	32

4.1.2	Vzorek číslo 2 Natur Carob	33
4.1.3	Vzorek číslo 3 Wheat bran extract.....	34
5	Měření minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu na zařízení Indoza	36
5.1	Vzorek číslo 1 Novopassit	36
5.2	Vzorek číslo 2 Natur Carob	37
5.3	Vzorek číslo 3 Wheat bran extract.....	38
6	Měření dle ČSN EN 50 281–2–1	40
6.1	Vzorek číslo 1 Novopassit	40
6.2	Vzorek číslo 2 Natur Carob	41
6.3	Vzorek číslo 3 Wheat bran extract.....	42
7	Měření na modifikovaném přístroji.....	44
7.1	Vzorek číslo 1 Novopassit	44
7.2	Vzorek číslo 2 Natur Carob	45
7.3	Vzorek číslo 3 Wheat bran extract.....	45
7.4	Zpracování výsledků měření modifikovanou metodou	46
7.4.1	Vzorek číslo 1 Novopassit	47
7.4.2	Vzorek číslo 2 Natur Carob	51
7.4.3	Vzorek číslo 3 Wheat bran extract.....	52
8	Porovnání naměřených hodnot.....	54
9	Diskuze výsledků měření.....	57
10	Závěr	59
11	Použitá literatura:	60
	Seznam obrázků	62
	Seznam tabulek	63
	Seznam zkratk	64
	Seznam příloh.....	65

Vysvětlení základních pojmů dle [1,6]

- Hořlavá látka: látka ve formě plynu, páry, kapaliny, pevné látky nebo jiných směsí, která pokud dojde k iniciaci může vyvolat exotermickou reakci s oxidačním prostředkem.
- Výbuch: rychle probíhající chemická oxidační reakce, doprovázená silným vývinem tepla a tlakovými projevy. Oxidačním činidlem je obvykle vzdušný kyslík, ale obecně to může být chlór, chlorečnany, dusičnany apod.
- Deflagrace: výbuch šířící se podzvukovou rychlostí
- Detonace: výbuch šířící se nadzvukovou rychlostí a vyznačující se rázovou vlnou.
- Výbušná směs: koncentrace hořlavých plynů, par a prachu ve směsi s oxidačním činidlem v rozmezí mezi spodní mezí výbušnosti a horní mezí výbušnosti, která je schopná výbušné přeměny.
- Meze výbušnosti: meze rozsahu výbušnosti.
- Dolní mez výbušnosti: LEL (lower, explosion limit): dolní mez rozsahu výbušnosti.
- Horní mez výbušnosti: UEL (upper, explosion limit): horní mez rozsahu výbušnosti.
- Iniciace: počáteční energetický podnět dodaný výbušné směsi.
- Prach: částice tuhé látky, menší než 0,5 mm, schopné vytvořit disperzní soustavu (pro vláknité materiály znamená rozměr 0,5 mm maximální průměr částice).
- Disperzní soustava: rozvířený prach v plynném médiu, obvykle se vzduchem.
- Hořlavý prach: všechny oxidovatelné organické i anorganické materiály v práškovém stavu, ať to jsou finální produkty, nebo odpadní látky.
- Technicko bezpečnostní parametry: soubor hodnot fyzikálně-chemických veličin, charakterizujících vznětlivost a výbušnost prachu.
- Zrnitost: zastoupení rozměrových tříd částic v hmotnostních procentech.
- Nejnižší teplota vznícení rozvířeného prachu t_{\min}^r : nejnižší teplota horkého prostředí, při které se vznítí rozvířený prach za předepsaných zkušebních podmínek. Tato teplota je obecně vyšší, než teplota vznícení usazeného prachu. Uvádí se ve °C.
- Indukční doba vznícení τ_i : doba, která uplyne od začátku tepelného zatěžování vzorku, po jeho vznícení.
- Rychlost šíření plamene: rychlost přenosu plamene po vrstvě daného tvaru a délky za předepsaných zkušebních podmínek. Uvádí se v $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
- Rozvířitelnost prachu: schopnost prachu vytvořit disperzní směs za daných zkušebních podmínek. Uvádí se v hmotnostních procentech.

1 Úvod

Tato diplomová práce navazuje na bakalářskou práci, zaměřenou na modifikaci přístroje pro stanovení minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu, jejím cílem bylo upravit stávající zařízení tak, aby bylo možno stanovit indukční dobu vznícení. Diplomová práce je zaměřena na stanovení minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu na modifikovaném přístroji, pro vybrané vzorky prachů. Cílem je stanovit, jak ovlivňuje způsob namáhání vzorku naměřené hodnoty minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu.

Modifikovaný přístroj vychází ze zařízení zkonstruovaného dle ČSN EN 50281-2-1. Díky provedeným úpravám lze na tomto zařízení stanovit indukční dobu vznícení vzorku prachu. Po modifikaci má zařízení upravený způsob rozvířování vzorku do prostoru pece. Vzorek je do prostoru pece přiváděn dolním otvorem, oproti původnímu uspořádání, kdy byl vzorek prachu rozvířován do prostoru pece horním otvorem, pomocí skleněného adaptéru. Po úpravě rozvířování vzorku existuje určitý předpoklad, že se bude prach vyskytovat v prostoru pece delší dobu. Tímto by měla být prodloužena doba tepelného namáhání vzorku prachu a hodnoty minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu by měly být nižší než při měření dle normy ČSN EN 50281-2-1.

Pro srovnání výsledků měření na modifikovaném přístroji byly vybrány dvě metody. Metoda stanovení minimální teploty vznícení v rozvířeném stavu dle ČSN EN 50281-2-1 a metoda k stanovení minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu používaná v akreditované zkušebně výbušnosti hořlavých prachů VVUÚ a.s. Ostrava-Radvanice (dále jen „Indoza“).

Hlavní část diplomové práce obsahuje naměřené hodnoty prachových vzorků, jejichž výběr byl proveden ve spolupráci se zkušebnou hořlavých prachu VVUÚ a.s. Ostrava-Radvanice. Rovněž výsledky měření dle ČSN EN 50281 byly získány ve spolupráci s touto zkušebnou a měření na zařízení Indoza proběhlo v prostorách zkušební laboratoře. Měření na modifikovaném přístroji probíhalo v laboratoři protivýbuchové prevence Fakulty bezpečnostního inženýrství VŠB-TUO.

2 Teoretická část

Požáry a výbuchy prachu jsou známy více než 200 let. Zpočátku jsou tyto události spojené se zemědělstvím a to hlavně s mletím obilí ve větrných mlýnech a při skladování v silech, ale také s výrobou škrobu, cukru, čokolády nebo koření. Dále se objevují např. v rafinériích, při zpracovávání hliníku a gumy. V procesech, kde je s hořlavými prachy nakládáno, je složité požárům a výbuchům předcházet. K výbuchu prachu může dojít, jakmile dojde k jeho rozvíření ve vzduchu a vytvoření oblaku prachu s vhodnou koncentrací a zároveň pokud je přítomný dostatečný iniciační zdroj. Nejčastěji se jedná o prachy vytvořené z materiálů, jako je uhlí, dřevo, mouka, škrob, cukr, guma, plasty, dále některé kovy, farmaceutické výrobky apod. [6,12]

2.1 Výskyt výbuchu prachu

První zmínku o výbuchu prachu lze v literatuře nalézt již od roku 1785, avšak záznamy popisující systematickým způsobem tyto události, jsou dostupné až z počátku 20. století. Nejstarší záznamy se týkají např. lodní přepravy, provozu v pekárnách, výroben škrobu, skladování obilí a mletí obilí. [12]

Mezi průmyslové činnosti, kde se vyskytuje nebezpečí výbuchu prachu v současné době patří zpracovávání dřeva a jeho skladování, skladování obilí v silech, kontejnerech a manipulace na dopravnících, mletí mouky a krmiv, výroba a skladování kovů, jako je hliník a hořčík, chemická výroba, výroba plastů, výroba škrobu, cukrářská výroba, výroba a skladování koření, cukru a kakaa, zpracovávání a nakládání s uhlím, farmaceutická výroba. [12]

Mezi operace, při kterých se prach vytváří anebo je s ním nakládáno patří redukce velikosti, manuální nebo mechanizovaná přeprava, odlučování prachu, sušení, prosévání a třídící operace, míchání a směšování, skladování, balení. [12]

2.2 Hořlavé prachy

Prach je tvořen částicemi pevné látky menší než 0,5 mm, přičemž u vláknin může být délka vlákna větší než 0,5 mm a některé atypické materiály se mohou chovat jako prachy i při větších rozměrech částic. [5]

Dle [10] částice hrubší než 0,425 mm nepřispívají ke zvýšení tlaku, který vzniká při výbuchu v uzavřené nádobě. Naopak částice o velikosti 0,075 mm jsou obecně

považovány za plně se účastnící procesu hoření. Za nejnebezpečnější jsou obecně považovány prachy s velikostí zrna menší než 75 μm .

Prach se vyskytuje ve dvou stavech a to jako usazený prach, který se nazývá aerogel a rozvířený prach, ten nazýváme aerosol. Přitom prach může snadno přejít z jednoho stavu do druhého. Usazený prach lze rozvířit a naopak rozvířený prach sedimentací přechází do usazeného stavu. [5]

Vlastnosti prachu se od vlastností kompaktní látky liší především proto, že prachové částice mají mnohem větší měrný povrch, a tím i reaktivnost. Tvar jednotlivých částic je různorodý, může být plochý, zrnitý, hranatý, vláknitý apod. Velikost částic je v dané směsi rovněž velmi rozmanitá. Pro charakteristiku prachu nelze stanovit počet prachových částic v daném prostoru. Vzhledem k rozměrům částic prakticky neexistuje homogenní prach a je také mimořádně obtížné homogenní prach uměle vyrobit. Při pohybu rozvířeného prachu se tvoří časové změny koncentrace, protože pevné částice různě rychle sedimentují v závislosti na velikosti. Nejdůležitějším vlivem je zde tíže. V důsledku třecího odporu volně padající částice prachu dosáhne relativně rychle konstantní konečné rychlosti. Tato rychlost sedimentace, je podle (1.1) funkcí velikosti částice, hustoty a viskozity disperzního prostředí a lze ji vypočítat podle Stokesova vztahu (pro částice kulového tvaru) [6]:

$$v = \frac{2}{9} \cdot g \cdot r^2 \cdot \frac{(\rho_c - \rho_p)}{\eta} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.1)$$

kde

g ... je gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

ρ_c ... hustota částice [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

ρ_p ... hustota disperzního prostředí [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

r ... poloměr částice [m],

η ... dynamická viskozita disperzního prostředí [$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$].

2.3 Mechanismus výbuchu prachu

Hořlavý prach je schopen oxidační reakce doprovázené vývinem tepelné a světelné energie. Tato reakce je doprovázená zásadní změnou původní hmoty. Hořlavý prach může např. vznikat z hmoty, která obsahuje více než 10 hmotnostních procent látky schopné oxidace. [5]

Pokud dojde k vytvoření hořlavého oblaku prachu, smísením vzduchu a prachu ve správném poměru a v ohraničeném prostoru a pokud dojde k iniciaci, nastává prudké spalování a dochází k šíření plamene napříč oblakem. [12]

Dle [7] bývá výbuch prachu obecně důsledkem rychlého uvolnění tepla při chemické reakci. Reakci lze zapsat ve tvaru rovnice (1.2):



V některých zvláštních případech např. u kovového prachu může probíhat exotermická reakce s dusíkem nebo oxidem uhličitým. Avšak nejčastějším oxidačním prostředkem bývá obecně kyslík. Teoreticky každá hmota, která není oxidována na maximální oxidační stupeň může být za určitých podmínek hořlavá. To vylučuje látky jako jsou křemičitany, sírany, dusičnany, uhličitany, a fosfáty. Proto jsou nevýbušné např. oblaka prachu vytvořené z portlandského cementu, písku, vápence a podobně. [7]

Mezi materiály, u kterých může dojít k výbuchu prachu patří:

- přírodní organické materiály (obilí, len, cukr, atd.),
- syntetické organické materiály (plasty, pigmenty, pesticidy atd.),
- uhlí a rašeliny,
- kovy (hliník, hořčík, zinek, železo, atd.). [7]

2.4 Podmínky pro průběh výbuchu prachu

Hoření probíhá, pokud jsou splněny tři požadavky a to přítomnost hořlavé látky, oxidačního prostředku a zápalného zdroje. Tyto podmínky definují tak zvaný „hořlavý soubor“, který je znázorňován jako trojúhelník. Není důležitá orientace tohoto trojúhelníku, ale tyto podmínky musí být v každém konkrétním případě s určitou mírou splněny. U výbuchu prachu je potřeba splnit o dvě podmínky více, jde o promíchání prachu a vzduchu a ohraničení oblaku prachu. Tím vzniká tzv. „pětúhelník výbuchu prachu“. K výbuchu tedy dojde pokud je přítomný hořlavý prach ve vhodné formě, přístupný oxidační prostředek, přítomný iniciační zdroj, dodržen určitý stupeň ohraničení oblaku prachu a pokud je prach v rozvířeném stavu. [15,12]

Mezi prachy a plyny existují určité rozlišnosti, které mají zásadní vliv na navrhování bezpečnostních standardů. V první řadě je mechanismus vytváření a udržování oblaku prachu a směsí hořlavých plynů nebo par hořlavých kapalin se vzduchem podstatně rozdílný. To znamená že ve většině případů, kde může dojít ke snadnému vytvoření výbušné směsi

hořlavého plynu se vzduchem, je vytvoření výbušného oblaku prachu nepravděpodobné. Zadruhé, není šíření plamene u prachovzduchových směsí limitováno pouze koncentrací rozvířeného prachu. Prach ve stavu usazené vrstvy poskytuje další možnost pro šíření plamene. [12]

Je si tedy nutno uvědomit, že každý požár hořlavého prachu může velmi snadno přejít ve výbuch a naopak. Výbuch prachu může přejít v hoření zbytku nezreagovaného prachu. Po výbuchu nemusí následovat požár, pokud je výbuchem spotřebován vzdušný kyslík, resp. pokud je příslušně snížen obsah kyslíku v prostoru. [5]

Prostředí s nebezpečím výbuchu hořlavých prachů se vytváří v prostoru, kde se může vytvořit nebezpečné množství výbušné směsi prachu se vzduchem, to znamená, že při zapálení směsi může dojít přímým nebo nepřímým účinkem ke zranění osob a k poškození věcí. Aby se mohla vytvořit výbušná směs hořlavého prachu se vzduchem, musí být k dispozici dostatečné množství prachových částic, tj. skutečná koncentrace prachu c_{SKUT} musí být větší než nebezpečná koncentrace c_{NEB} dle (1.4) [5]:

$$c_{SKUT} \geq c_{NEB} \quad (1.4)$$

Nebezpečná koncentrace c_{NEB} se určuje na základě dolní meze výbušnosti daného prachu LEL viz (1.5) [5]:

$$c_{NEB} = k_B \cdot LEL \dots [\text{obj. \%}] \quad (1.5)$$

kde

k_B ... je bezpečnostní koeficient, pro vnitřní prostory výrobního zařízení $k_B = 0,5$,
LEL ... dolní meze výbušnosti [obj. %].

U prachů si je nutno uvědomit, že oblak rozvířeného prachu není obvykle homogenní a koncentrace může velmi kolísat podle víření usazeného prachu a jeho rozptýlení do atmosféry. Na rozdíl od plynů a par mohou prachy rozvířením místní vrstvy či hromádky prachu vytvářet místní koncentrace. [5]

2.5 Požárně technické charakteristiky prachů

Na rozdíl od plynů a kapalin, u nichž je možné většinu požárně technických charakteristik zjistit v bezpečnostních listech a případně v jiných zdrojích, je situace v oblasti hořlavých prachů odlišná. K mnohým z nich lze bezpečnostní parametry rovněž dohledat v odborné literatuře, avšak hodnoty jsou uváděny jako intervaly většího rozsahu a mají spíš

informativní charakter. Charakter hořlavých prachů a jejich bezpečnostní parametry závisí vždy na konkrétní technologii a manipulaci s látkou.[13]

2.5.1 Maximální výbuchový tlak

Udává maximální tlak který se vyvine v uzavřené nádobě během výbuchu výbušné atmosféry o optimální koncentraci za určených podmínek testu. [10]

2.5.2 Maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku

Maximální hodnota nárůstu tlaku za časovou jednotku během výbuchu všech výbušných atmosfér v mezích výbušnosti hořlavé látky v uzavřené nádobě za specifických podmínek testu. Je-li měření prováděno v nádobě 1 m³, pak je tato veličina nazývána kubická konstanta K_{St}. [10]

Tato veličina je mírou výkonu (destrukčních účinků) výbuchu a je používána při návrhu konstrukčních protivýbuchových opatření. [10]

Maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku charakterizuje maximální výkon dané výbušné směsi. Její závislost na objemu vyjadřuje kubický zákon. [10]

Kubická konstanta K_{St} se vypočítá dle vztahu (4.1) [10]:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} \cdot V^{\frac{1}{3}} = K_{St} = konst. \quad [\text{MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.1)$$

kde

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\max} \quad \dots \text{je maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku v } \text{MPa} \cdot \text{s}^{-1},$$
$$V \quad \dots \text{objem nádoby v m}^3.$$

Platnost kubického zákona je u směsí plynů a par hořlavých kapalin se vzduchem od objemu nádoby 5 litrů a u prachovzduchových směsí od 40 litrů. [5]

Maximální výbuchový tlak se s rostoucím objemem nemění. V kubických nádobách je dosahováno tlaků až 1,3 MPa u hořlavých prachů. Rychlost šíření plamene může být až 500m.s⁻¹. [5]

Kubická konstanta je důležitým parametrem vyjadřujícím brizanci směsi nezávisle na objemu, ve kterém byla stanovena. Kubická konstanta u prachovzduchových směsí se označuje K_{St} a podle ní se hořlavé prachy rozdělují do tříd viz tabulka 1. [5]

Tabulka 1: Rozdělení hořlavých prachů podle hodnot kubické konstanty.

Třída	K_{St} [MPa.m.s ⁻¹]	Příklady hořlavých prachů		
		Prach	p_{max} [MPa]	K_{St} [MPa.m.s ⁻¹]
St 1	0-20	PVC	8,5	9,8
		PE	8,8	13,1
St 2	20-30	celulóza	9,8	22,9
		dřevo	10,5	23,8
St 3	Nad 30	pigment	10,7	34,4
		hliník	12,5	200,0

Za technicko bezpečnostní parametr s K_{St} může považovat tehdy, jsou-li splněny tyto požadavky [5]:

- Optimální koncentrace směsi se vzduchem,
- Shodný stupeň turbulence prachu se vzduchem,
- Stejný druh a stejná energie iniciačního zdroje,
- Stejný tvar kubické nádoby.

U podlouhlých nádob a u potrubí kubický zákon neplatí. S rostoucí délkou nádoby a potrubí se zvyšuje maximální výbuchové parametry a projevuje se směrový účinek výbuchového tlaku. Rychlost šíření čela plamene se může zvýšit až na detonační rychlost 200 m.s⁻¹ s radiálními tlaky 3 MPa. [5]

2.5.3 Dolní mez výbušnosti

Minimální koncentrace paliva, která umožňuje šíření plamene v oblaku prachu. U plynů se používá dolní i horní mez výbušnosti, které jsou charakteristickými parametry pro daný plyn. [5]

Horní mez výbušnosti UEL se při bezpečnostních úvahách u prachů nepoužívá, protože provoz při koncentracích nad horní mezí výbušnosti není možno považovat za bezpečný. Nikdy totiž nelze zaručit homogenitu prachového mraku a také je nutno uvažovat možnou změnu koncentrace sedimentací. Nebezpečí výbuchu proto hrozí i tehdy, když je skutečná koncentrace vyšší než horní mez výbušnosti. Navíc horní meze výbušnosti bývají velmi vysoké – několik tisíc g.m⁻³. Proto se takovéto vysoké koncentrace i v uzavřeném technologickém zařízení jen málokdy dosáhne. [10]

2.5.4 Minimální iniciační energie

Minimální iniciační energie E_{min} je nejmenší energie kapacitní jiskry, která je schopna zapálit nejsnadněji iniciovatelnou směs hořlavé látky (plyn, pára, prach) ve směsi s oxidačním prostředkem. Pro prachy se stanovuje pro celou řadu koncentrací prachu ve vzduchu. S rostoucí iniciační energií se rozšiřuje rozsah výbušnosti, přičemž se zejména horní mez posouvá k vyšším hodnotám. Znalost hodnot této veličiny je důležitá pro posuzování potenciálního nebezpečí iniciace hořlavých plyných směsí elektrostatickými a indukovanými výboji. [2]

2.5.5 Teplota vzplanutí, vznícení a žhnutí usazeného prachu

Teplota vzplanutí usazeného prachu je definována jako nejnižší teplota prostředí, při které dojde působením vnějšího zápalného zdroje k zapálení směsi plyných produktů rozkladu. Tato hodnota umožňuje určit nejnižší teplotu horkého povrchu, při kterém dojde přiblížením např. plamene k povrchu prachu k jeho vzplanutí. [2]

Teplota vznícení usazeného prachu je definována jako nejnižší teplota prostředí, při které dojde k samovolnému zapálení směsi plyných produktů rozkladu bez přítomnosti vnějšího zápalného zdroje. Tato hodnota umožňuje posoudit možnost vznícení usazené vrstvy prachu od horkých povrchů. Tato hodnota je využívána pro stanovení teplotní třídy pro nevýbušná elektrická zařízení. [2]

Teplota žhnutí usazeného prachu je definována jako nejnižší teplota prostředí, při které dojde k trvalému žhnutí prachu. Tato hodnota umožňuje určit nejnižší teplotu horkého povrchu, při kterém dojde k trvalému žhnutí prachu a tím i ke vzniku iniciačního zdroje případné prachovzdušné směsi. Tato hodnota rovněž umožňuje porovnání s teplotní třídou zařízení v nevýbušném provedení do prostředí s nebezpečím výbuchu hořlavých prachů. [2]

2.5.6 Minimální teplota vznícení rozvířeného prachu

Teplota vznícení rozvířeného prachu je definována jako nejnižší teplota prostředí, při které dojde k samovolnému zapálení směsi plyných produktů rozkladu bez přítomnosti vnějšího zápalného zdroje. Tato hodnota umožňuje posoudit možnost vznícení prachovzdušné směsi od horkých těles, je vyžadována pro specifikaci elektrického zařízení pro prostory s výskytem hořlavého prachu a je důležitým parametrem pro potlačení výbuchu. Minimální teplota vznícení závisí mimo jiné na geometrii horkého povrchu a na dynamickém stavu oblaku prachu. [2,16]

2.5.7 Mezní koncentrace kyslíku

Limitní obsah kyslíku je nejvyšší koncentrace kyslíku ve směsi hořlavina–kyslík–inert, při které ještě nedochází k hoření nebo explozi. Znalost tohoto parametru má velký význam pro ochranu zařízení, technologie před nebezpečím výbuchu pomocí inertního plynu (N₂, CO₂, atd.). U většiny organických látek se limitní obsah kyslíku pohybuje kolem 10 až 12 %, tzn. při inertizaci např. sil s hořlavým prachem je nutno udržovat hodnotu kyslíku pod touto hranicí. [2]

2.5.8 Stanovení náchylnosti k samovznícení

Výsledky zkoušky vypovídají o sklonech práškových materiálů při skladování se samovzněcovat. Tato hodnota je důležitá pro stanovení indukční doby, kdy dojde za určitých podmínek k samovznícení práškové hmoty a pro zařazení materiálů do tříd pro železniční a silniční dopravu. [13]

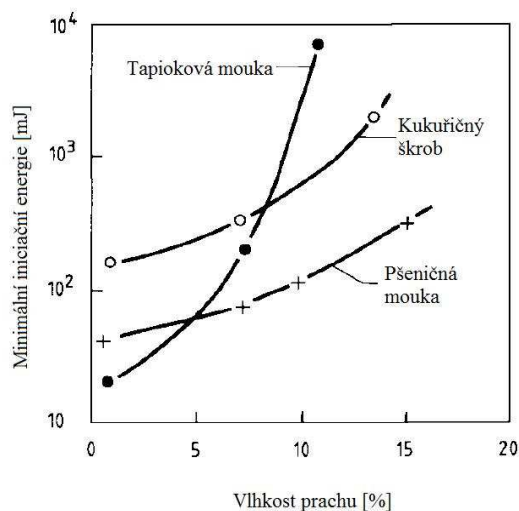
2.6 Faktory ovlivňující výbušnost prachu

Existuje několik faktorů, které ovlivňují jak snadno lze danou prachovzduchovou směs iniciovat, průběh výbuchu prachu a jeho parametry a tím i jeho účinky.

2.6.1 Chemické složení prachu a vlhkost prachu

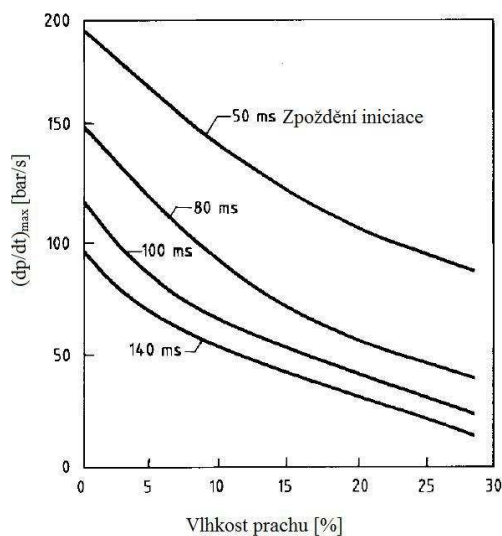
Chemické vlastnosti prachu ovlivňují množství tepla a rychlost uvolňování tepla během spalování. Při použití matematických modelů, jsou teoretické hodnoty výbuchového tlaku získané výpočty vyšší než hodnoty získané experimentálně. To proto, že při výpočtu se předpokládají ideální podmínky pro spalování, tzn. stechiometrické složení prachovzduchové směsi a dokonalé spálení paliva. [7]

Vlhkost prachu má vliv na jeho výbuchové parametry a zároveň ovlivňuje jak snadno lze danou prachovzduchovou směs iniciovat. Se zvyšující se vlhkostí prachu dochází ke zvyšování minimální iniciační energie. Obrázek 1 ilustruje vliv vlhkosti prachu na velikost minimální iniciační energie. Vliv vlhkosti prachu na minimální teplotu vznícení je méně výrazný, než je tomu u minimální iniciační energie, např. pro mouku o 14 % vlhkosti je hodnota minimální teploty vznícení rozvířeného prachu 470 °C, zatímco pro suchou mouku je to 440 °C. U škrobu jsou hodnoty minimální teploty vznícení 400 °C pro suchý prach a 460 °C pro prach s 13 % vlhkostí. [7]



Obrázek 1: Vliv vlhkosti na hodnotu minimální iniciační energie[7]

Na obrázku 2 je znázorněn vliv vlhkosti na maximální rychlost narůstání tlaku, s rostoucí vlhkostí prachu dochází k snižování tohoto výbuchového parametru. Iniciační zpoždění charakterizuje stupeň turbulence prachovzduchové směsi v momentu iniciace, v tom smyslu, že se zvyšujícím se zpožděním dochází ke snížení intenzity turbulence. [7]



Obrázek 2: Vliv vlhkosti na maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku. [7]

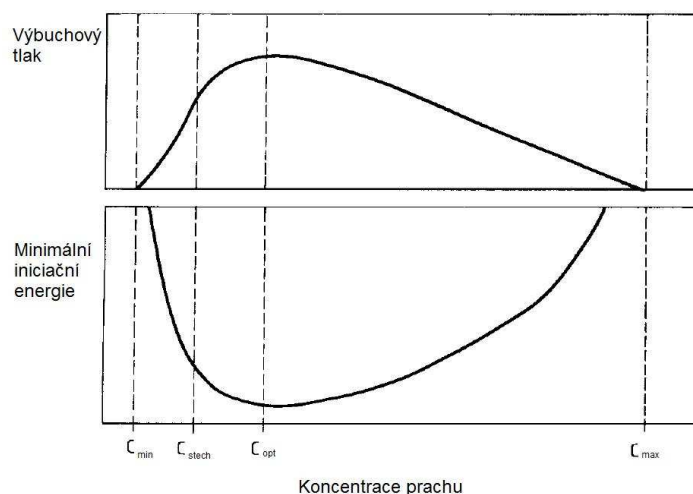
Vlhkost ovlivňuje výbuchové parametry a snadnost iniciace několika způsoby. Při odpařování a ohřevu vody dochází k ochlazování směsi, dochází ke směšování vodní páry s plynnými produkty pyrolýzy v zóně předehtřívání a vytváří se méně reaktivní směs plynů. Dále se zvyšuje soudržnost částic prachu což zabraňuje rozptýlení prachu na jednotlivé částice. [7]

2.6.2 Koncentrace prachu

K výbuchu prachu nedojde, pokud není koncentrace prachu v určitých mezích. Toto pravidlo je analogické se spalováním homogenních směsí plynů se vzduchem. [7]

Pokud porovnáme maximální přípustné koncentrace prachu podle hygienických limitů a koncentrace dolní meze výbušnosti většiny běžných prachů, jsou hygienické limity nižší o tři až čtyři řády. To znamená, že pokud se v některých ojedinělých případech na pracovišti vyskytnou koncentrace prachu, které by překračovaly hygienické limity, jsou stále hluboko pod koncentracemi, které umožňují šíření plamene. Navíc výbušné oblaka prachu mají relativně vysokou optickou hustotu, a to i v případě dolní meze výbušnosti. Z výše uvedeného vyplývá, že při běžném provozu je nízká pravděpodobnost vytvoření koncentrace, která by dosahovala hodnot dolní meze výbušnosti. Výbušné koncentrace prachu se tedy obvykle nacházejí uvnitř technologického zařízení, jako jsou mlýny, sušičky, filtry apod. [7,8]

Je zde tedy významný rozdíl mezi primárním výbuchem prachovzduchové směsi a výbuchem směsi hořlavého plynu se vzduchem. V případě nakládání s plynem, obsahuje technologické zařízení pouze plyn bez přístupu vzduchu. Za těchto okolností je výbuch uvnitř technologického zařízení nepravděpodobný. Ve většině případů tedy dochází k výbuchu plynu mimo technologická zařízení, kdy při jeho úniku, dochází ke směšování se vzduchem a vytváření výbušné atmosféry. [7]



Obrázek 3: Výbuchová charakteristika hořlavého prachu se vzduchem. [7]

V rozmezí výbušné koncentrace prachu nejsou ani výbuchové parametry, ani hodnoty minimální iniciační energie konstantní. Na obrázku 3 je znázorněn typický

výbuchový tlak a typický průběh minimální iniciační energie v závislosti na koncentraci prachu. [7]

Koncentrace c_{\min} je koncentrace při dolní mezi výbušnosti, c_{stech} je stechiometrická koncentrace, c_{opt} optimální koncentrace a c_{\max} je horní mez výbušnosti. [7]

Dolní koncentrační mez je určena jako minimální množství částic paliva, které musí existovat pro průběh řádného spalování. Mezi koncentrací prachu a iniciační energií existuje téměř parabolický vztah. Iniciační energie nabývá vysokých hodnot při vysokých množstvích prachu a snižuje se při snižující se koncentraci prachu. Avšak další snižování koncentrace prachu ústí ke zvyšování potřebné iniciační energie. [12]

Horní koncentrační meze jsou závislé na minimálním množství kyslíku (nebo jiného oxidačního prostředku), který je potřeba pro explozi. [12]

2.6.3 Vliv velikosti částic

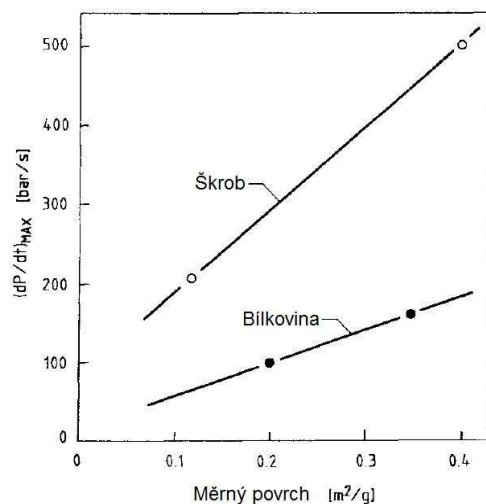
Velikost částic prachu má velice významnou roli v procesu hoření. Větší částice prachu se podílí na procesu šíření plamene neefektivně, zatímco jemnější částice prachu ze stejného materiálu jsou schopné během hoření zreagovat rychleji a mnohem efektivněji. Jemnější prachy tedy reagují prudčeji než prachy hrubé, přičemž se velikost zrna výrazněji projevuje na změně prudkosti výbuchu než na výbuchovém tlaku. To je způsobeno větším povrchem jemnějších částic prachu, navíc menší částice jsou snadněji rozvířitelné a mohou zůstat ve vznosu po delší dobu. Při zvyšování velikosti částic tedy dochází k poklesu měrného povrchu, což má zásadní vliv na vývoj těkavých látek z prachových materiálů, následně dochází ke spalování těchto těkavých látek. V některých případech existuje možnost, že se velmi malé částice nahromadí do podoby hrudky. Pokud k tomuto dojde, schopnost šíření plamene se u takovéto prachovzduchové směsi snižuje. [11,12]

Pro zkušebníckou praxi vyplývá požadavek, že při stanovení veličin prachů ,musí být vzorek připraven tak, aby hlavní podíl částic měl rozměr menší než 40 μm . [6]

Když je prach ve vznosu, obsahuje celé spektrum prachových částic od velmi jemných až po částice hrubé. Jemné částice zastávají významnou roli v procesu vznícení a šíření plamene. Vliv hrubých částic prachu není významný, vyjma situace, kdy prach obsahuje vysoký podíl hrubých částic. U prachu je rovněž významný vliv tvaru částic prachu. Nepravidelně tvarované částice představují vyšší nebezpečí výbuchu, než částice kulové. [8,16]

Hořlavé prachy o velikosti zrna větší než je mezní rozměr 400 μm obecně nelze přivést k výbuchu ani silným iniciačním zdrojem (10 000J). Je však nutno si uvědomit, že stačí jen malá příměs jemného prachu k hrubému prachu 10%, resp. 5%, aby bylo možno směs hrubého prachu přivést k výbuchu, přičemž výbuchový tlak dosahuje téměř hodnot maximálního výbuchového tlaku jemných podílů. Nebezpečí výbuchu proto hrozí vždy, když je překročena spodní mez výbušnosti jemných podílů prachu obsažených ve směsi s nevýbušným hrubým prachem. [6]

Toto zjištění dovoluje učinit závěr, že překročení mezního průměru zrna nelze považovat za bezpečnostní opatření proti výbuchu prachu, protože nepatrný podíl přimíšeného jemného prachu stačí k tomu, aby se vytvořila výbušná směs. [6]



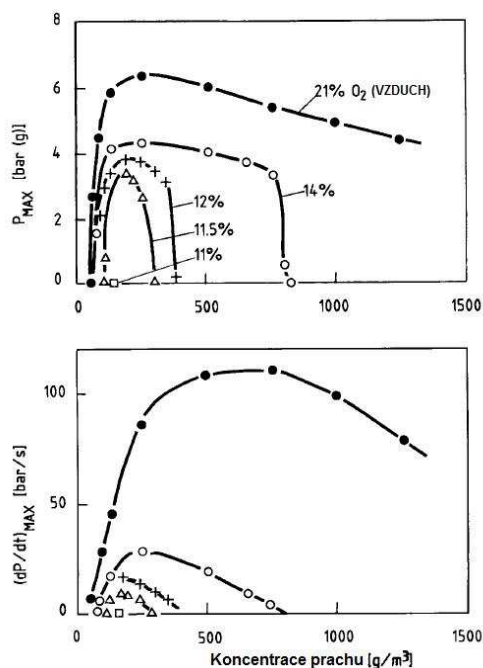
Obrázek 4: Závislost maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku na měrném povrchu. [7]

Na obrázku 4 je znázorněna závislost maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku na velikosti měrného povrchu, jedná se o obecný trend u většiny prachů. Nicméně tento vzestupný trend nepokračuje nekonečně dlouho, existuje určitá limitní velikost částice, při které se tento vzestupný trend zastavuje. Například pro uhlí je tato velikost částice 50 μm , pro přírodní organické prachy je to hodnota okolo 10 μm a pro prachy některých organických barviv je ještě podstatně nižší. U prachů kovů je tato limitní hodnota podstatně nižší než u většiny organických materiálů, protože u kovů nedochází k produkci plynných těkavých látek, ale k tání, odpařování a následně k hoření. [7]

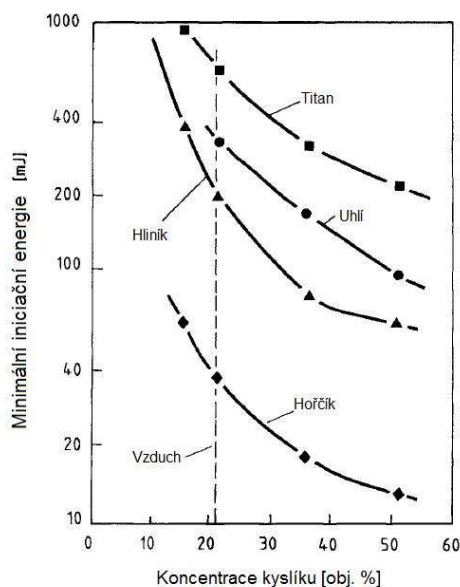
2.6.4 Koncentrace oxidačního prostředku

Oxidační prostředek je jednou ze stran tzv. „pětiúhelníku výbušnosti“, nejčastěji se jedná o vzdušný kyslík. Zvýšený obsah kyslíku způsobí zvýšení výbuchových parametrů s výjimkou spodní meze výbušnosti, která zůstane neovlivněna. V důsledku většího množství

reagující látky je teplota plamene vyšší. Proto se také zvyšují maximální výbuchové parametry. Při vyšší koncentraci kyslíku dochází ke zvyšování rychlosti hoření paliva, naopak při nižší koncentraci se rychlost spalování snižuje. Koncentrací kyslíku v atmosféře, ve které výbuch probíhá, je rovněž ovlivněna schopnost, iniciovat danou prachovzduchovou směs. [7]



Obrázek 5: Vliv obsahu koncentrace kyslíku na výbuchové parametry. [7]



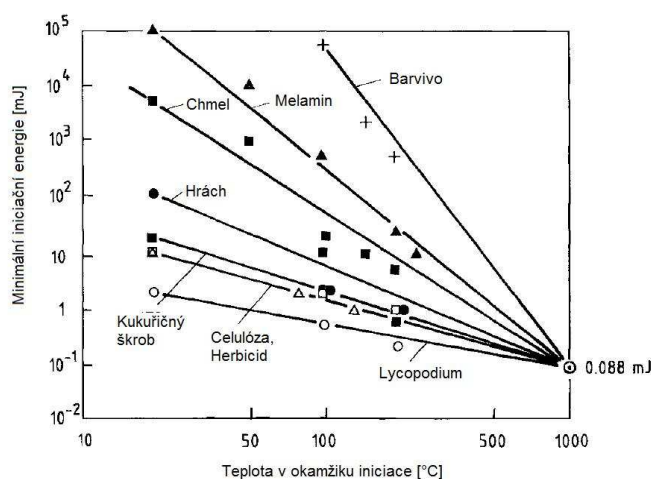
Obrázek 6: Vliv koncentrace kyslíku na hodnoty minimální iniciační energie. [7]

Na obrázku 5 je znázorněno, jakým způsobem dochází k ovlivnění hodnot výbuchových charakteristik při snížení koncentrace kyslíku. Na obrázku 6 je ovlivnění

hodnot minimální iniciační energie. Mimo vlivu koncentrace kyslíku na výbuchové parametry je na obrázku 5 vidět zúžení výbušné koncentrace ze strany horní meze výbušnosti prachovzduchové směsi. [7]

2.6.5 Vliv teploty

Při zvyšování počáteční teploty dochází ke snižování dolní meze výbušnosti a zároveň ke zvyšování horní meze výbušnosti. Vliv počáteční teploty na minimální iniciační energii je znázorněn na obrázku 7. Pro testované organické materiály byl nalezen společný bod, ve kterém se protínají přímky vzniklé pomocí lineární regrese z hodnot měření jednotlivých vzorků. Přímky se protínají při teplotě 1000 °C a minimální iniciační energii 0,088 mJ. Z toho vyplývá, že hodnoty minimální iniciační energie při zvýšených teplotách lze pro organické prachy odhadnout na základě interpolace mezi tímto společným bodem a naměřenými hodnotami minimální iniciační energie při laboratorních podmínkách. [7]



Obrázek 7: Vliv teploty na minimální iniciační energii. [7]

Při zvyšování teploty v okamžiku iniciace dochází ke snížení maximálního výbuchového tlaku v důsledku snížení koncentrace kyslíku na jednotku objemu při daném tlaku. U maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku není tento trend zcela zřetelný, jelikož se na něm podílejí složité kinetické vztahy. [7]

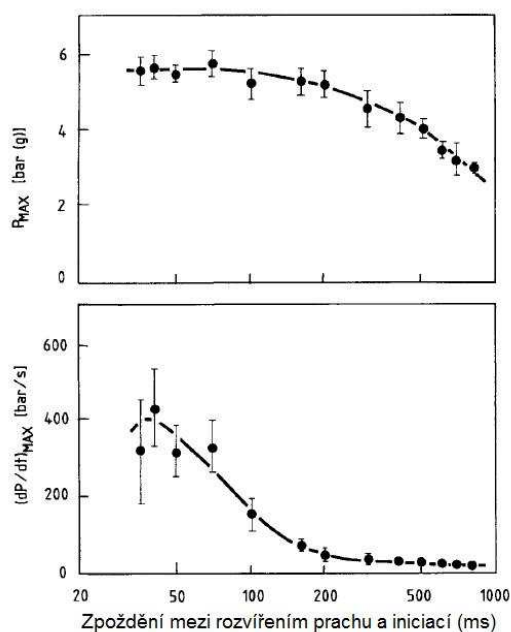
2.6.6 Vliv turbulence

S rostoucí turbulencí směsi v okamžiku iniciace se zvyšují maximální výbuchové parametry, zejména maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku. V praktických podmínkách je turbulence stav oblaku prachu, kdy dochází k prudkému vnitřnímu, více či méně náhodnému pohybu malých elementů oblaku prachu, vzájemně vůči sobě v trojrozměrném prostoru. Turbulence způsobuje u spalovaného oblaku míchání horké

spálené a spalované části oblaku prachu spolu s nespálenými částmi. Z tohoto důvodu probíhá hoření v turbulentním oblaku mnohem rychleji než u klidového oblaku, kde se čelo plamene šíří v jedné rovině. [7]

Při iniciaci oblaku prachu elektrickou jiskrou, nebo horkým povrchem, dochází vlivem turbulence k narušení přenosu tepla (prudkým prouděním dochází k odebrání tepla ze zóny zapalování). Proto iniciace turbulentního oblaku prachu obecně, vyžaduje vyšší energii nebo teplotu než iniciace klidového oblaku. [7]

Na obrázku 8 je znázorněn charakteristický příklad ovlivnění výbuchových parametrů turbulencí v okamžiku iniciace. V počáteční fázi, při rozvívání prachu, je turbulence relativně vysoká, avšak po rozvívání prachu se začíná snižovat. Je zde vidět, že při snížení stupně turbulence dochází k výraznému poklesu hodnot maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku. Měření bylo provedeno pro prach lycopodium o koncentraci 420 g/m^3 v nádobě o objemu 1,2 litrů. [7]



Obrázek 8: Vliv turbulence v okamžiku iniciace na výbuchové parametry. [7]

2.6.7 Počáteční tlak v okamžiku iniciace

Maximální výbuchové parametry se s rostoucím počátečním tlakem rovnoměrně zvyšují. Je tomu tak proto, že se zvětšuje množství směsi o optimální koncentraci. Snížení tlaku naopak zmenšuje maximální výbuchové parametry. [5]

U prachů se s rostoucím počátečním tlakem zvyšuje optimální koncentrace. Většímu množství vzdušného kyslíku ve zkomprimované atmosféře je nutno pro dosažení optimální koncentrace přidat větší podíl prachu. [5]

2.6.8 Přítomnost hořlavých plynů

Přítomnost hořlavých plynů v oblaku prachu má vliv na výbuchové parametry prachovzduchových směsí. Snižuje se dolní mez výbušnosti, minimální teplota vznícení a minimální iniciační energie a optimální koncentrace. Naopak se zvyšuje hodnota maximálního výbuchového tlaku a maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku. [5]

2.6.9 Vliv velikosti objemu

Experimentálním zkoumáním velkého počtu hořlavých prachů ukazují, že pro objemy větší než $0,04 \text{ m}^3$ platí také pro prachové výbušné soubory „kubický zákon“. Je tedy možno na základě výsledků měření v malé nádobě pomoci výše uvedeného vztahu odhadnout prudkost výbuchu ve velké nádobě. [6]

2.6.10 Vliv iniciační energie

Maximální výbuchový tlak je jen málo ovlivněn druhem zápalného zdroje. Jinak je tomu u prudkosti výbuchu a tedy hodnoty kubické konstanty, kde je zřejmé, že přechodem do silného pyrotechnického zdroje (10 KJ) k jiskřišti (10 J) klesají velmi významně hodnoty kubické konstanty. Pomalu reagující prachy jsou přitom silněji ovlivněny než reaktivní prachy. Silné iniciační energie jsou tedy při zkoušení prachů nutné, pro jednoznačné zhodnocení výbušných vlastností prachů. [6]

3 Popis měřících metod ke stanovení minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu

Minimální teplota vznícení rozvířeného prachu je nejnižší teplota prostředí, při které dojde k samovolnému zapálení směsi plyných produktů rozkladu bez přítomnosti vnějšího zápalného zdroje. Znalost minimální teploty vznícení prachu je nezbytná pro vyloučení potenciálních zdrojů vznícení a pro projektování systému k potlačení výbuchu. [12,14]

V kapitole 5 až 7 je uveden postup a výsledky měření minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu. Toto měření bylo provedeno na třech odlišných zařízeních, na zařízení Indoza, na zařízení zkonstruovaném dle normy ČSN EN 50281-2-1 a dále na zařízení dle ČSN EN 50281-2-1 po provedené modifikaci.

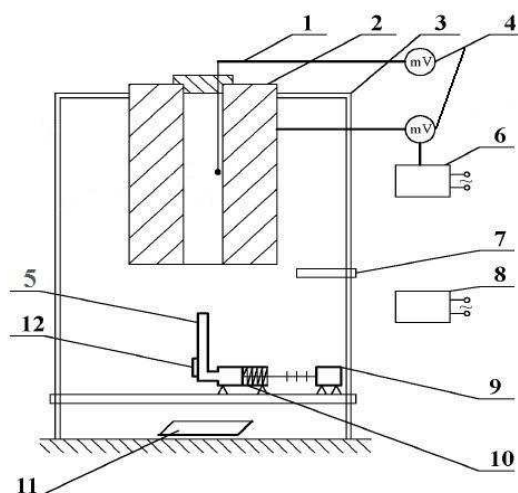
3.1 Stanovení minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu na zařízení Indoza

Tento přístroj je používán akreditovanou zkušebnou výbušnosti hořlavých prachů, plynů a par, ve VVUÚ a.s. Ostravě–Radvanicích ke stanovení minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu. Nejedná se o metodu prováděnou podle normy, ale o pracovní postup pracoviště, který byl pro tuto činnost akreditován.

3.1.1 Konstrukce zkušebního zařízení

Zařízení Indoza je zobrazeno na obrázku 9. Toto zařízení se skládá z válcové vertikální pece s vnitřním průměrem 60 mm a výškou 200 mm. Teplotu pece je možno regulovat. Maximální teplota pece, která je při zkoušce dosahována je 800 °C. Pec je umístěna na stojanu, to proto aby se při zkoušení vzorků prachu, dal sledovat probíhající děj v peci. Stojan zároveň tvoří vodící tyče pro rozvíření vzorku do pece. K peci je vedeno odvětrávání, kterým se odvádí zplodiny vzniklé při spalování zkoušených vzorků. Tyto zplodiny se odstraňují z prostoru pece vyfoukáním a následně dochází k jejich odsávání odvětrávacím systémem.

K měření teploty se používá termočlánek, který je umístěn v 1/2 výšky pece u její stěny, vyhodnocování teploty je prováděno přístrojem Therm. Na stojanu pece je umístěna zarážka s aretací, tato zarážka určuje výšku zasunutí rozvířovací trysky do pece a zároveň slouží ke spuštění rozvířovacího zařízení. Dále je na stojanu umístěn pohyblivý jezdec a na něm je umístěno rozvířovací zařízení a čidla ovládající čítač. [14]



Obrázek 9: Schematické zobrazení měřícího zařízení.

Popis obrázku 9:

1. Termočlánek
2. Pec
3. Vodicí tyč
4. Milivoltmetr
5. Rozviřovací dýza
6. Autotransformátor
7. Zarážka
8. Čítač impulsů
9. Indukční spínač
10. Pumpička
11. Zrcadlo
12. Fotonka

Rozviřovací zařízení se skládá ze vzduchové pumpičky a rozviřovací trysky. Vzduchová pumpička má vnitřní průměr 32,5 mm a je ovládaná perem. Pumpička se spouští v okamžiku, kdy při zasunutí dýzy do pece, dojde k nárazu do zarážky. Objem rozviřovacího vzduchu je možné nastavit ve čtyřech stupních po 6 mm (tj. objem 5, 10, 15, 20 cm³). Pro měření je nastaven 1. stupeň tj. 5 cm³. Rozviřovací tryska je našroubována na trubce a má tvar válcového mezikruží jehož hloubka je regulovatelná a je nastavena na minimální objem, který se zcela vyplňuje vzorkem. Hmotnost vzorku je tedy 25 mg ± 10 mg dle sypané

hmotnosti vzorku. Podle potřeby je možné měnit objem rozvířovacího vzduchu a množství vzorku. [14]

Měření indukční doby vznícení je provedeno spínačem, který dává signál ke spuštění hodin, a který je aktivován chodem pumpičky. Hodiny zastaví signál z fotonky (Tesla WK 650 36 HN), která reaguje na plamen zapáleného vzorku. Čítač má citlivost 1 ms s rozsahem do 8 s. Maximální zpoždění časového obvodu od začátku chodu pumpičky do zastavení čítače je 9 ms. Zplodiny hoření jsou z pece odstraněny vyfoukáním. [14]

Ke stanovení se používá vzorek s částicemi menšími než 0,063 mm, případně jiný, vždy s uvedením síťové analýzy. [14]

3.1.2 Průběh zkoušky

Pec se před zkouškou vyhřeje na 800 °C. Poté se napájení pece sníží na takovou hodnotu přibližně 50 V, aby se zajistil vhodný pokles teploty pece. Před nasypáním vzorku do rozvířovací dýzy se natáhne pumpička a vynuluje se čítač tlačítkem nula. Do rozvířovací dýzy se nasype vzorek. Pomocí štětce se odstraní zbytky vzorku, které ulpěly na fotonce při naplňování rozvířovací dýzy. Zkontroluje se teplota pece a při žádoucí teplotě se rozvířovací dýza zasune do pece po zarážku. Tímto dojde k rozvíření vzorku a spuštění čítače. Při zasunování dýzy se musí sledovat probíhající děj v peci. Rozvířovací dýza se vysune z pece a odečte se hodnota indukční doby vznícení. Pec se vyfouká od zplodin hoření a pokračuje se novou zkouškou. [14]

Při teplotách blízkých minimální teplotě vznícení dochází k případu, že intenzita plamene je nižší než citlivost fotonky, která takový plamen nezaregistruje a čítač nevypne. Proto se vznícení pozoruje také vizuálně přes zrcadlo. V takovémto případě, pokud dochází ke vznícení bez zaregistrování fotonkou, se do záznamu zapíše HOŘÍ. V případě, že vznikají pouze jednotlivé jiskry, považuje se výsledek zkoušky za negativní. Měření při nejvyšší teplotě při níž ještě nedošlo ke vznícení vzorku se provádí minimálně dvakrát. [14]

3.1.3 Výsledek měření

Z naměřených hodnot se sestaví tabulka a graf. Výsledkem je minimální teplota vznícení prachu a jí odpovídající indukční doba vznícení. Není-li při min. teplotě vznícení naměřena indukční doba uvede se čas naměřený při nejbližší vyšší teplotě s poznámkou indukční doba větší než a daná hodnota. [14]

3.1.4 Vyhodnocení výsledků

Podle naměřených hodnot se vzorek prachu vyhodnocuje a zařadí se do jedné ze čtyř kategorií:

- teplota vznícení do 400 °C - vzorek je velmi vznětlivý,
- teplota vznícení od 400 do 600 °C - vzorek je vznětlivý,
- teplota vznícení od 600 do 800 °C - vzorek je obtížně vznětlivý,
- teplota vznícení nezměřitelná - vzorek není vznětlivý do teploty 800 °C.

Indukční doba vznícení se slovně nehodnotí. [14]

3.1.5 Nejistota měření

Nejistoty měření byly u tohoto zařízení stanoveny na základě výsledků dlouhodobých měření. Nejistota měření teploty je 20 °C a indukční doby vznícení 20 %.

3.2 Měřicí zařízení dle ČSN EN 50 281

Dle [7] vzniklo měřicí zařízení a postup pro stanovení minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu z výsledků zkoumání Godbert-Greenwaldovy pece a po následné úpravě tohoto zařízení. Godbert-Greenwaldova pec byla využívána ve spojených státech již od roku 1960 a ve Velké Británii od roku 1968. Evropská komise pro normalizaci v elektrotechnice přijala modifikovanou Godbert-Greenwaldovu pec jako standard pro určování minimální teploty vznícení rozvířeného prachu.

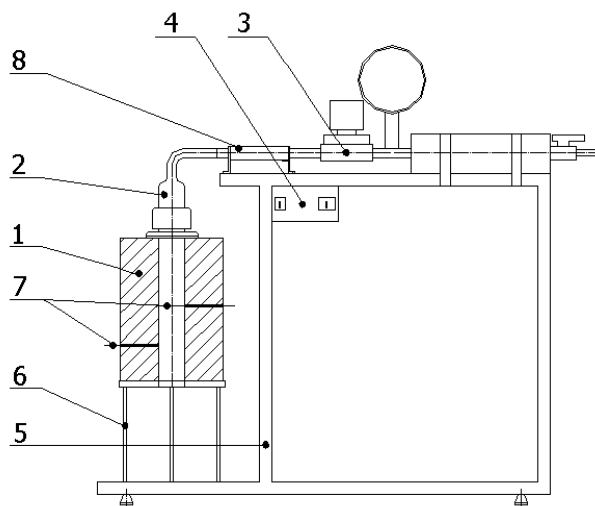
Zařízení pro měření minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu, znázorněno na obrázku 10, je zkonstruováno podle normy ČSN EN 50281-2-1, která v příloze B stanoví požadavky na konstrukční provedení pece a rozvířovacího zařízení. Jedná se o českou normu, která je verzí evropské normy EN 50281-2-1. Česká republika přijala tuto normu v souvislosti s členstvím v Evropské komisi pro normalizaci v elektrotechnice. Tato norma uvádí dvě metody, metodu A pro stanovení minimální teploty vznícení usazeného prachu a metodu B ke stanovení minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu.

Metoda B stanovuje minimální teplotu horkého povrchu, při které dochází ke vznícení daného vzorku rozvířeného prachu nebo jiných podobných částic. Podle normy [3] se tato zkouška provádí jako doplňková zkouška po stanovení minimální teploty vznícení prachu ve vrstvě metodou A. Pro stanovování minimální teploty vznícení není vhodné používat vzorky známých výbušnin např. střelný prach, dynamit nebo jiné směsi látek, které se za určitých okolností mohou chovat podobně.

Norma [3] uvádí, že je použitelná pro průmyslová zařízení, kde je prach v rozvířeném stavu přítomen pouze po krátkou dobu, protože samotná zkouška umožňuje pouze krátkou dobu pobytu částic uvnitř pece. Zároveň tato metoda není použitelná pro prach, který může po delším časovém období než je předpokládaná doba zkoušky touto metodou, uvolňovat plyny z usazeného prachu v důsledku pyrolýzy nebo doutnání. Vzorek prachu musí být připraven tak, aby byl homogenní a reprezentoval zkoumaný prach.

3.2.1 Konstrukce zkušebního zařízení

Detaily o konstrukci zkušebního zařízení jsou uvedeny v ČSN EN 50 281. Zařízení, které je znázorněno na obrázku 10 se skládá z pece, která je vyhřívána křemičitou trubící. Průměr křemičité trubice je 38 mm a výška je 230 mm. Křemičitá trubice je svislá a je ve svém dolním konci otevřená do atmosféry. V horním konci pece je rovněž otvor, kterým je do pece rozprašován prach pomocí skleněného adaptéru. Skleněný adaptér je napojen na zásobník prachu a na solenoidový ventil, jehož otevřením se uvolní stlačený vzduch z nádrže, díky čemuž dojde k rozprašení prachu do pece. Rozvířovací zařízení je znázorněno na obrázku 11. Aby bylo možno snadno sledovat spodní konec trubice je pec nainstalována na stojanu.



Obrázek 10: Schematické zobrazení měřícího zařízení.

Popis obrázku 10:

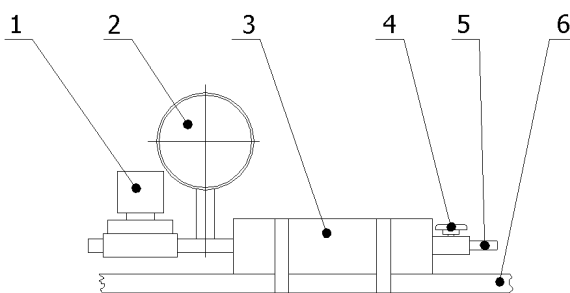
- 1 – Elektricky vyhřívaná pec
- 2 – Skleněný adaptér
- 3 – Rozvířovací aparatura
- 4 – Spínač
- 5 – Nosná konstrukce

6 – Stojan pece

7 – Termočlánky

8 – Zásobník na prach

K měření a k regulaci teploty v peci slouží dva termočlánky, jeden je umístěn uvnitř křemičité trubice tak, aby měřil teplotu vnitřní stěny křemičité trubice. Druhý termočlánek je umístěn z vnější strany trubice a je napojen na regulátor teploty pece. Maximální povolená teplota pece je 1000°C.



Obrázek 11: Rozviřovací aparatura.

Popis obrázku 11:

1 – Solenoidový ventil o průměru 10 mm

2 – Manometr s přesností odečtu 2 kPa

3 – Zásobník na vzduch objem 0,5 dm³

4 – Kulový ventil

5 – Vstup pro tlakový vzduch

6 – Nosná konstrukce

3.2.2 Průběh zkoušky

Naváží se vzorek 0,1g prachu a vloží se do zásobníku na prach. Pec se vyhřeje na teplotu 500°C a tlak rozviřovacího vzduchu se nastaví na 10kPa. Stiskem spínače a tudíž otevřením solenoidového ventilu se prach rozpráší do pece a pokud nedojde ke vznícení, opakuje se zkouška opět se stejnou navážkou avšak s teplotou zvýšenou o 50 °C. Takto se pokračuje až do dosažení vznícení nebo pokud teplota pece nedosáhne 1000°C. [3]

Pokud dojde ke vznícení prachu mění se hmotnost prachu a tlak vzduchu tak dlouho dokud nedojde k intenzivnějšímu vznícení. S použitím těchto hodnot se pokračuje ve zkoušce a teplota pece se snižuje po krocích o 20 °C dokud nedojde ke vznícení při 10 pokusech za sebou. Po dosažení teploty, při které nedochází ke vznícení procesem snižování teploty

se zkouška provede znovu s nejbližší nižší teplotou s nižšími a vyššími hodnotami hmotnosti prachu a rozvířovacího tlaku. [3]

Pokud dochází ke vznícení i při 300°C, teplota se dále snižuje po krocích o 10 °C. Po dosažení teploty při které nedochází ke vznícení (procesem snižování teploty) se zkouška provede znovu s nejbližší nižší teplotou s nižšími a vyššími hodnotami hmotnosti prachu a rozvířovacího tlaku. Pokud je to nutné, dále se snižuje teplota až do doby kdy při 10 pokusech za sebou nedojde ke vznícení. [3]

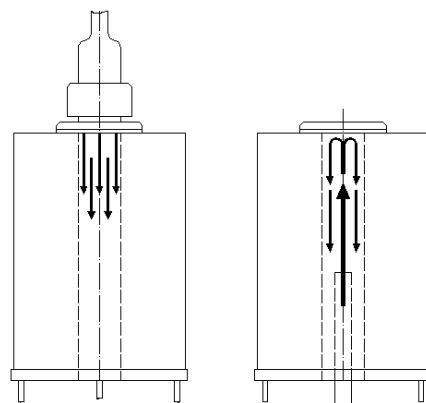
U tohoto měření se jiskry bez plamene nepovažují za vznícení. Za minimální teplotu vznícení je nejnižší teplota pece, při které došlo ke vznícení při výše uvedeném postupu, snižená o 20 °C pro teploty pece vyšší než 300 °C a snižená o 10 °C pro teploty pece 300 °C nebo nižší. [3]

3.2.3 Nejistota měření

Nejistota měření teploty je ± 10 °C.

3.3 Měřicí zařízení dle ČSN EN 50 281-2-1 po modifikaci

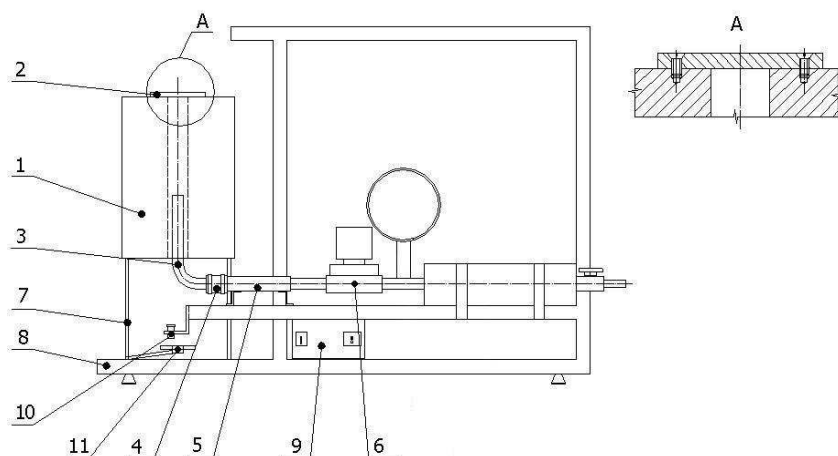
Na měřicím zařízení byly provedeny určité úpravy, první úprava se týká způsobu přivádění prachu do pece a druhá úprava zahrnuje instalaci měřicího okruhu, za účelem zjišťování indukční doby vznícení prachu. Úprava způsobu přivádění vzorku do pece je znázorněná na obrázku 12, kdy je prach přiváděn spodním otvorem. Prach se v peci pohybuje směrem vzhůru a dochází k jeho rozvíření. Následně nastává sedimentace prachu, v závislosti na charakteru prachu, jeho vlastnostech a prostředí, ve kterém je rozvířen. Díky tomuto způsobu rozvíření prachu by se měl prach vyskytovat v prostoru pece delší dobu a mělo by dojít k delšímu tepelnému namáhání vzorku oproti postupu dle normy.



Obrázek 12: Způsob rozvířování prachu - vlevo původní způsob, vpravo po úpravě.

3.3.1 Konstrukce zkušebního zařízení

Základní části přístroje jsou elektricky vytápěná pec, rozvířovací zařízení a měřicí zařízení. Byla použita stávající elektricky vytápěná pec dle normy [3], horní otvor pece byl zaslepen víkem dle obrázku 13. Rozvířovací zařízení se skládá z měděné trubky, silikonové spojky a stávajícího zařízení dle normy [3], tedy zásobníku prachu, solenoidového ventilu, manometru, tlakového válce, kulového ventilu a hubice pro nasunutí hadice s přívodem tlakového vzduchu.



Obrázek 13: Sestava upraveného zařízení.

Popis obrázku 13:

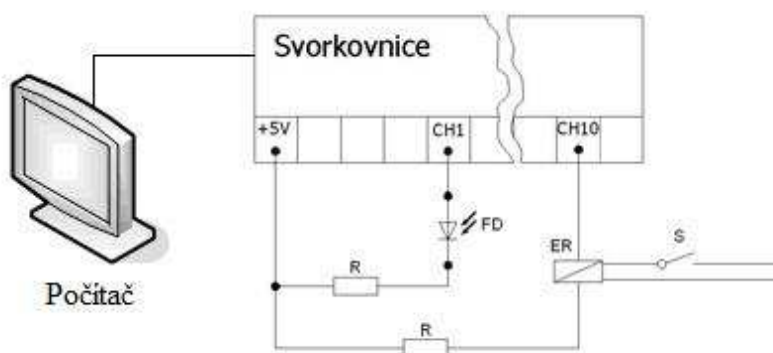
- 1 – Elektricky vyhřívaná pec
- 2 – Víko pece
- 3 – Trubka pro přívod prachu
- 4 – Silikonová spojka viz obrázek 6
- 5 – Zásobník na prach
- 6 – Rozvířovací zařízení viz obrázek 3
- 7 – Stojan pece
- 8 – Nosná konstrukce
- 9 – Spínač
- 10 – Fotodioda
- 11 – Zrcátko

Pro měření indukční doby vznícení je pod dolním otvorem pece umístěn detektor, který reaguje na vznícení a světelné záření, které ho doprovází. Dále je pod prostorem pece umístěno zrcátko o rozměrech 50x50 mm, které slouží k pozorování děje v peci.

Měřicí část je tvoří dva hlavní měřicí okruhy. První slouží k měření teploty a druhý k měření indukční doby vznícení. Měření teploty je realizováno termočlánkem umístěným uvnitř pece, který snímá teplotu křemičité trubice. Termočlánek je připojen na digitální teploměr Greisinger GMH 3250. Druhý termočlánek měří teplotu v oblasti vinutí odporového drátu a je napojen na regulátor teploty Clare 4.0.

Měření indukční doby vznícení, doby od rozvíření měřeného vzorku prachu až po vznícení, je realizováno okruhem, který tvoří počítač, měřicí karta InstruNet model 100, svorkovnice, elektromagnetické relé a fotodioda. Měřicí karta je připojená k počítači přes PCI sběrnici, ke kartě je připojen externí Analog/Digitální převodník se svorkovnicí, do této svorkovnice je zapojen obvod s elektromagnetickým relé a fotodiodou.

Začátek měření je dán sepnutím tlačítka pro ovládání solenoidového ventilu, po kterém dojde k vypuštění tlakového vzduchu a tím i rozvíření prachu do pece. Při stisknutí tlačítka pro ovládání solenoidového ventilu, dojde k sepnutí sekundárního obvodu. Toto sepnutí je provedeno pomocí elektromagnetického relé, které je připojeno na obvod ovládající otevření solenoidového ventilu viz obrázek 14. Bylo použito relé Weidmueller PT5.



Obrázek 14: Schéma zapojení relé a fotodiody na svorkovnici.

Popis obrázku 14:

R – Odpor 1k Ω

FD – Fotodioda

ER – Elektromagnetické relé

S – Spínač solenoidového ventilu

Vznícení prachu, respektive světelný projev této oxidační reakce je detekován fotodiodou, ta je připojena na svorkovnici. Vznícení se projeví zvýšením napětí na měřeném

kanálu, kde je zapojena fotodiody. Toto zvýšení nastane při vznícení a po dopadu záření na fotodiodu, jedná se o fotodiodu PIN SFH 2030.

3.3.2 Průběh zkoušky

Před zkouškou se pec vyhřeje na výchozí teplotu, což je 700°C, tato teplota zajišťuje vznícení většiny hořlavých prachů. Měření je prováděno od vyšších teplot k nižším. Na počítači se zapne program určený k měření a nastaví se potřebné hodnoty pro měření indukční doby vznícení. Bližší popis nastavení parametrů pro měření měřicí kartou je uveden v příloze 3.

Je potřeba vyzkoušet různé hmotnosti navážky a hodnoty tlaku vzduchu tak dlouho, dokud nedojde k intenzivnějšímu vznícení a s těmito hodnotami se dále pokračuje ve zkoušce (obdobně jako u normovaného postupu). Teplota pece se dále snižuje po krocích o 20 °C.

Před každým rozvířením prachu do pece se zásobník prachu s naváženým vzorkem zajistí západkou proti otevření a nastaví se rozvířovací tlak. V základním menu programu se spustí měření kliknutím na tlačítko start. Stiskne se tlačítko spínače a zároveň pozorujeme dění v peci pomocí zrcátka umístěného pod dolním otvorem pece. Po stisknutí spínače dojde k rozvíření prachu do pece a ke spuštění měření indukční doby vznícení. Při vznícení dochází k nárůstu napětí na kanále fotodiody, čas při kterém k nárůstu dojde je indukční doba vznícení. Před začátkem nové zkoušky je potřeba vypustit tlakový vzduch rozvířovacím zařízením do pece bez vzorku prachu, za účelem vyfoukání zplodin a nespálených zbytků z prostoru pece. Dále se očistí kryt fotodiody a zrcátko. Sníží se teplota pece o 20°C a mezitím se připraví nová zkouška.

Tímto způsobem se pokračuje v měření dokud se nedosáhne teploty, při níž nedojde ke vznícení vzorku prachu. V tomto případě se zvýší teplota pece o 50 °C a pokračuje se v měření při snižování teploty pece o 10 °C. Ve snižování teploty se pokračuje tak dlouho, dokud se nedosáhne negativního výsledku, tedy nedojde ke vznícení. Měření při teplotě, při které nedošlo ke vznícení se opakuje pětkrát. Pokud při jednom pokusu dojde ke vznícení vzorku, opět snížíme teplotu o 10 °C a cyklus pěti měření pro ověření negativního výsledku opakujeme. U některých vzorků a při určitých teplotách může dojít k vzniku málo intenzivního plamene, na který nebude fotodiody schopna zareagovat. V takovém případě se na místo indukční doby vznícení napíše zjištění, získané pozorováním průběhu zkoušky zrcátkem. Pokud se vzorek vznítí zapíše se hoří a pokud pouze jiskří, zapíše se jiskří. Jiskření však není považováno za pozitivní výsledek.

3.3.3 Vyhodnocení výsledků

Výsledky měření se zapisují do tabulky. Za teplotu vznícení (t_{\min}^r) se považuje nejnižší teplota pece, při níž došlo k vznícení vzorku alespoň při jednom z pěti pokusů. Do tabulky se uvádí minimální teplota vznícení a jí odpovídající indukční doba vznícení. Hodnocení měření lze provést podle tabulky 2.

Tabulka 2: Hodnocení měření.

Rozsah v němž byla teplota naměřena	Hodnocení měření
$t_{\min}^r \leq \text{do } 400\text{ }^{\circ}\text{C}$	velmi vznětlivý
$400\text{ }^{\circ}\text{C} < t_{\min}^r \leq 600\text{ }^{\circ}\text{C}$	vznětlivý
$600\text{ }^{\circ}\text{C} < t_{\min}^r$	obtížně vznětlivý
teplota nezjištěna	do teploty $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ je prach nevznětlivý

3.3.4 Nejistota měření

Nejistota měření teploty je $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, nejistota měření indukční doby vznícení je 7 %.

4 Vzorky hořlavých prachů

Pro měření byly vybrány 3 vzorky prachů, jednalo se o vzorky Novopassit, Natur Carob a Wheat bran extract. Tyto vzorky byly vybrány ve spolupráci se zkušební laboratoří č. 1025 VVUÚ a.s. Ostrava-Radvanice. Přehled zkoušených vzorků a jejich granulometrický stav je uveden v tabulce 3. U těchto vzorků byl dále proveden síťový rozbor vyjadřující procentuální podíl zrn ve vzorku prachu.

Tabulka 3: Vzorky prachu.

Číslo vzorku	Název vzorku	Granulometrický stav vzorku
1	Novopassit	Původní
2	Natur Carob	Původní
3	Wheat bran extract	< 0,063 mm

4.1 Síťový rozbor vzorků

Účelem rozboru je, zjistit rozdělení zrn vzorku v rozmezí 0,04 mm až 6,3 mm. Rozbor se provádí proséváním přes síta se známou velikostí ok a o průměru 200 mm, sada se skládá ze sít o velikostí ok 0,04 mm; 0,063 mm; 0,1 mm; 0,16 mm; 0,25 mm; 0,4 mm; 0,63 mm; 1,0 mm; 1,6 mm; 2,5 mm; 4 mm a 6,3 mm. Ke stanovení se používá vzorek s minimální vlhkostí, která ještě nezpůsobuje sdružování zrn vzorku a jeho lepení. [14]

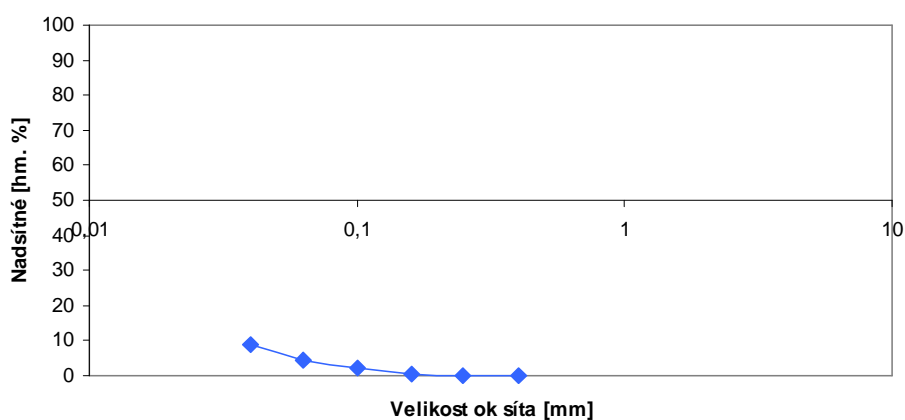
4.1.1 Vzorek číslo 1 Novopassit

Jedná se o prášek používaný při výrobě léku ve farmaceutickém průmyslu. Vzorek byl zkoušen v granulometrickém stavu P, což je původní dodaný vzorek zbavený cizorodých částic.

Tabulka 4: Stanovení zrnitosti pro vzorek Novopassit.

Granulometrický stav	P
Síto	Nadsítné
(mm)	(hm. %)
0,040	9,0
0,063	4,4
0,10	2,0
0,16	0,4
0,25	0,1
0,40	0,0

Sít'ový rozbor vzorku Novopassit je uveden v tabulce 4, jeho grafický výstup je znázorněn na obrázku 15.



Obrázek 15: Grafický výstup sít'ového rozboru vzorku Novopassit.

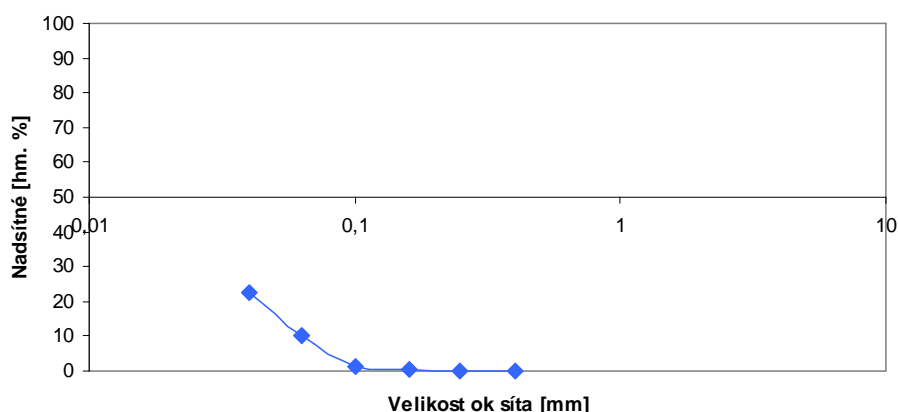
Střední velikost zrna vzorku Novopassit je $\ll 0,040$ mm.

4.1.2 Vzorek číslo 2 Natur Carob

Tento prach se získává při mletí lusků ze stromu zvaného Carob, dále se používá v potravinářském průmyslu jako např. náhrada kakaa. Vzorek byl rovněž zkoušen v granulometrickém stavu P, což je původní dodaný vzorek zbavený cizorodých částic. Sít'ový rozbor vzorku Natur Carob je uveden v tabulce 5, grafické znázornění výsledků je na obrázku 16.

Tabulka 5: Stanovení zrnitosti pro vzorek Natur Carob.

Granulometrický stav	P
Síto	Nadsítné
(mm)	(hm. %)
0,040	22,5
0,063	10,0
0,10	1,4
0,16	0,4
0,25	0,1
0,40	0,0
0,63	



Obrázek 16: Grafický výstup síťového rozboru vzorku Natur Carob.

Střední velikost zrna vzorku Natur Carob je $\ll 0,040$ mm.

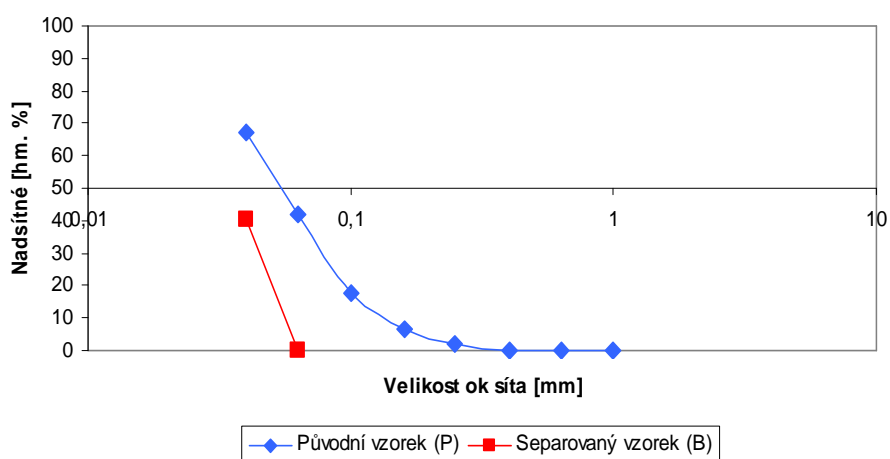
4.1.3 Vzorek číslo 3 Wheat bran extract

Wheat bran extract je prach, který vzniká z pšeničných otrub a používá se například v kosmetickém průmyslu. U vzorku Wheat bran extract byla provedena separace přes síto 0,063 mm na frakci menší než 0,063 mm. U tohoto vzorku, jehož výsledky jsou v tabulce 6 a na obrázku 17, byl dále proveden síťový rozbor, pro stav:

- původní (granulometrický stav P)
- separovaný (granulometrický stav B)

Tabulka 6: Stanovení zrnitosti pro vzorek Wheat bran extrakt.

Granulometrický stav	P	B
Síto	nadsítné	nadsítné
(mm)	(hm. %)	(hm. %)
0,040	67,0	40,5
0,063	42,0	0,0
0,10	17,8	
0,16	6,6	
0,25	1,8	
0,40	0,2	
0,63	0,1	
1,00	0,0	
1,60		



Obrázek 17: Grafický výstup síťového rozboru vzorku Wheat bran extract.

Střední velikost zrna původního vzorku je $(0,055 \pm 0,1)$ mm.

Střední velikost separovaného vzorku je $< 0,040$ mm. Pro měření minimální teploty vznícení byl použit separovaný vzorek.

5 Měření minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu na zařízení Indoza

Měření vzorků prachu na tomto zařízení, podle akreditovaného postupu bylo provedeno v prostorách zkušebny výbušnosti hořlavých prachů VVUÚ a.s. Ostrava Radvanice.

V pracovní postupu je uvedeno, že je možné objem vzduchu nastavit ve čtyřech stupních po 6 mm tzn. 5, 10, 15, 20 cm³. Hloubka rozvířovací dýzy je regulovatelná a lze tak nastavit množství vzorku, které bude měřeno. Je tedy možné měnit objem rozvířovacího vzduchu a množství vzorku. Avšak v praxi se pro měření standardně používají podmínky, kdy je nastaven objem rozvířeného vzduchu na hodnotu 5 cm³ a rozvířovací dýza je v poloze, která umožňuje rozvíření vzorku odpovídající množství 25 mg ± 10 mg, dle sytné hustoty vzorku.

5.1 Vzorek číslo 1 Novopassit

U tohoto vzorku od 610 °C měl plamen při vznícení nízkou intenzitu, kdy nebyl fotonkou registrován, proto není od této teploty v tabulce 7 zaznamenána indukční doba vznícení vzorku.

Tabulka 7: Stanovení minimální teploty vznícení rozvířeného prachu, vzorek Novopassit.

Číslo měření	Teplota prostředí	Indukční doba vznícení	Číslo měření	Teplota prostředí	Indukční doba vznícení
	t [°C]	τ [s]		t [°C]	τ [s]
1	800	0,041	19	580	Hoří
2	790	0,044	20	570	Hoří
3	780	0,047	21	560	Hoří
4	770	0,046	22	550	Hoří
5	760	0,048	23	540	Hoří
6	750	0,049	24	530	Hoří
7	740	0,051	25	520	Hoří
8	730	0,052	26	510	Hoří
9	720	0,050	27	500	Hoří
10	710	0,058	28	490	Hoří
11	700	0,065	29	480	Hoří
12	690	0,067	30	470	Hoří

13	680	0,083	31	460	Hoří
14	670	0,084	32	450	Hoří
15	660	0,086	33	440	Hoří
16	650	0,088	34	430	Hoří
17	640	0,093	35	420	Hoří
18	630	0,108	36	410	Hoří
19	620	0,120	37	400	Hoří
20	610	Hoří	38	390	Hoří
21	600	Hoří	39	385	Negativní
22	590	Hoří	40	380	Negativní

Minimální teplotou vznícení je u této metody aritmetický průměr mezi nejnižší teplotou kdy došlo ke vznícení a nejvyšší teplotou, kdy ke vznícení nedošlo. Přičemž u teplot ze kterých se počítá výsledná minimální teplota vznícení, musí být mezi nejnižší teplotou kdy došlo ke vznícení a nejvyšší teplotou, kdy ke vznícení nedošlo rozdíl nižší než 10 °C. Pro vzorek číslo 1 Novopassit tedy platí:

$$t_{\min}^r = \frac{t_2 - t_1}{2} = \frac{390 - 385}{2} = 387,5 \doteq 387^{\circ}\text{C} \quad (8.1)$$

kde

t_{\min}^r ... minimální teplota vznícení prachu v rozvířeném stavu [°C],

t_2 ... minimální teplota, při které došlo ke vznícení [°C],

t_1 ... maximální teplota, při které nedošlo ke vznícení [°C].

Tato hodnota se zaokrouhluje na celé číslo, směrem k nižší hodnotě. Pro vzorek číslo 1 Novopassit je minimální teplota vznícení rozvířeného prachu je 387 °C.

5.2 Vzorek číslo 2 Natur Carob

U tohoto vzorku docházelo od teploty 560 °C ke vznícení nízké intenzity, které fotonka nezaregistrovala a nedošlo k zastavení čítače. Proto je v tabulce 8 od hodnoty 560 °C místo indukční doby vznícení zapsán údaj hoří.

Tabulka 8: Stanovení minimální teploty vznícení rozvířeného prachu, vzorek Natur Carob.

Číslo měření	Teplota prostředí	Indukční doba vznícení	Číslo měření	Teplota prostředí	Indukční doba vznícení
	t [°C]	τ [s]		t [°C]	τ [s]
1	800	0,050	18	630	0,402
2	790	0,056	19	620	0,456
3	780	0,061	20	610	0,473
4	770	0,059	21	600	0,497
5	760	0,072	22	590	0,530
6	750	0,083	23	580	0,538
7	740	0,085	24	570	0,545
8	730	0,089	25	560	Hoří
9	720	0,086	26	550	Hoří
10	710	0,084	27	540	Hoří
11	700	0,092	28	530	Hoří
12	690	0,095	29	520	Hoří
13	680	0,133	30	510	Hoří
14	670	0,185	31	500	Hoří
15	660	0,215	32	490	Hoří
16	650	0,243	33	480	Hoří
17	640	0,326	34	475	Negativní

Minimální teplota vznícení rozvířeného prachu je 477 °C.

5.3 Vzorek číslo 3 Wheat bran extract

U tohoto vzorku docházelo již od teploty 800 °C a následně v celém rozsahu teplot ke vzniku plamene s nízkou intenzitou. Intenzita plamene byla nižší než citlivost fotonky, ta plamen nezaregistrovala a nedošlo k vypnutí čítače. Proto, jak je uvedeno v tabulce 9 nebyla z měření tohoto vzorku získána žádná hodnota indukční doby vznícení. Od teploty 400 °C docházelo při rozvíření vzorku do prostoru pece pouze k jiskření. U této zkoušky se však považuje vznik jednotlivých jisker za negativní výsledek.

Tabulka 9: Stanovení minimální teploty vznícení rozvířeného prachu, vzorek Wheat bran extract.

Číslo měření	Teplota prostředí	Indukční doba vznícení	Číslo měření	Teplota prostředí	Indukční doba vznícení
	t [°C]	τ [s]		t [°C]	τ [s]
1	800	Hoří	22	590	Hoří
2	790	Hoří	23	580	Hoří
3	780	Hoří	24	570	Hoří
4	770	Hoří	25	560	Hoří
5	760	Hoří	26	550	Hoří
6	750	Hoří	27	540	Hoří
7	740	Hoří	28	530	Hoří
8	730	Hoří	29	520	Hoří
9	720	Hoří	30	510	Hoří
10	710	Hoří	31	500	Hoří
11	700	Hoří	32	490	Hoří
12	690	Hoří	33	480	Hoří
13	680	Hoří	34	470	Hoří
14	670	Hoří	35	460	Hoří
15	660	Hoří	36	450	Hoří
16	650	Hoří	37	440	Hoří
17	640	Hoří	38	430	Hoří
18	630	Hoří	39	420	Hoří
19	620	Hoří	40	410	Hoří
20	610	Hoří	41	405	Negativní
21	600	Hoří	42	400	Negativní

Minimální teplota vznícení rozvířeného prachu je 407 °C.

6 Měření dle ČSN EN 50 281–2–1

U této metody se oproti předchozímu postupu měření nezahajuje na nevyšší možné teplotě pece, ale zahajuje se na teplotě 500 °C, při stanovené navážce a rozvířovacím tlaku. Pokud při této teplotě dojde ke vznícení, hledají se optimální podmínky pro vznícení vzorku prachu volbou navážky a tlaku vzduchu. Při těchto optimálních podmínkách dochází ke snižování teploty pece o 20 °C. Pokud při 500 °C nedojde ke vznícení, dochází ke zvyšování teploty až na hodnotu, při které se vzorek prachu vznítí (maximální teplota pece je 1000°C). Po dosažení této teploty následuje opět hledání optimálních podmínek pro vznícení prachu a následně snižování teploty pece.

U této metody je tedy možnost, přiblížit se volbou rozvířovacího tlaku a hmotnosti navážky k optimálním podmínkám pro vznícení prachovzduchové směsi.

6.1 Vzorek číslo 1 Novopassit

Při měření tohoto vzorku došlo ke vznícení až při teplotě 600 °C. Nejintenzivnější vznícení bylo při této teplotě pozorováno při hmotnosti vzorku 0,2 g a rozvířovacím tlaku 20 kPa, což je znázorněno v tabulce 10. Při teplotě 320 °C nedošlo při 10 pokusech za sebou ke vznícení. Teplota byla snížena na 300 °C a ani s nižšími a vyššími hodnotami hmotnosti prachu a rozvířovacího tlaku nedošlo ke vznícení.

Tabulka 10: Měření dle ČSN EN 50 281-2-1 vzorek Novopassit.

Číslo měření	Navážka [g]	Rozvířovací tlak [kPa]	Teplota v peci [°C]	Výsledek
1	0,1	10	500	Negativní
2	0,1	10	550	Negativní
3	0,1	10	600	Hoří
4	0,2	20	600	Hoří
5	0,2	20	580	Hoří
6	0,2	20	560	Hoří
7	0,2	20	540	Hoří
8	0,2	20	520	Hoří
9	0,2	20	500	Hoří
10	0,2	20	480	Hoří
11	0,2	20	460	Hoří

12	0,2	20	440	Hoří
13	0,2	20	420	Hoří
14	0,2	20	400	Hoří
15	0,2	20	380	Hoří
16	0,2	20	360	Hoří
17	0,2	20	340	Hoří
18-27	0,2	20	320	Negativní
28	0,1	10	300	Negativní
29	0,3	10	300	Negativní
30	0,1	50	300	Negativní
31	0,3	50	300	Negativní

Minimální teplota u této metody je teplota, při které došlo ke vznícení snižená o 20 °C pro teploty vyšší než 300 °C a snižená o 10 °C pro teploty pece 300 °C nebo nižší. [3]

Minimální teplota vznícení rozvířeného prachu je 320 °C.

6.2 Vzorek číslo 2 Natur Carob

U tohoto vzorku dochází ke vznícení již při teplotě 500 °C. V tabulce 11 je zvýrazněno, že k nejintenzivnějšímu vznícení došlo při navážce 0,2 g a rozvířovacím tlaku 50 kPa. Od teploty 420 °C nedochází ke vznícení ani při změnách hmotnosti a tlaku.

Tabulka 11: Měření dle ČSN EN 50 281-2-1 vzorek Natur Carob.

Číslo měření	Navážka [g]	Rozvířovací tlak [kPa]	Teplota v peci [°C]	Výsledek
1	0,1	10	500	Hoří
2	0,1	20	500	Hoří
3	0,2	20	500	Hoří
4	0,1	50	500	Hoří
5	0,2	50	500	Hoří
6	0,2	50	480	Hoří
7	0,2	50	460	Hoří
8	0,2	50	440	Negativní
9	0,2	50	440	Negativní

10	0,2	50	440	Negativní
11	0,2	50	440	Hoří
12-21	0,2	50	420	Negativní
22	0,1	50	400	Negativní
23	0,3	50	400	Negativní
24	0,3	20	400	Negativní

Minimální teplota vznícení rozvířeného prachu je 420 °C.

6.3 Vzorek číslo 3 Wheat bran extract

K vznícení tohoto vzorku došlo až při teplotě 950 °C viz tabulka 12, nejintenzivnější vznícení bylo pozorováno při navážce 0,3 g a rozvířovacím tlaku 20 kPa. Od teploty 370 °C nedošlo ke vznícení ani s nižšími a vyššími hodnotami hmotnosti prachu a rozvířovacího tlaku.

Tabulka 12: Měření dle ČSN EN 50 281-2-1, vzorek Wheat bran extract.

Číslo měření	Navážka [g]	Rozvířovací tlak [kPa]	Teplota v peci [°C]	Výsledek
1	0,1	10	500	Negativní
2	0,1	10	550	Negativní
3	0,1	10	600	Negativní
4	0,1	10	650	Negativní
5	0,1	10	700	Negativní
6	0,1	10	750	Negativní
7	0,1	10	800	Negativní
8	0,1	10	850	Negativní
9	0,1	10	900	Negativní
10	0,1	10	950	Hoří
11	0,2	10	950	Hoří
12	0,2	20	950	Hoří
13	0,3	20	950	Hoří
14	0,3	20	930	Hoří
15	0,3	20	910	Hoří
16	0,3	20	890	Hoří

17	0,3	20	870	Hoří
18	0,3	20	850	Hoří
19	0,3	20	830	Hoří
20	0,3	20	810	Hoří
21	0,3	20	790	Hoří
22	0,3	20	770	Hoří
23	0,3	20	750	Hoří
24	0,3	20	730	Hoří
25	0,3	20	710	Hoří
26	0,3	20	690	Hoří
27	0,3	20	670	Hoří
28	0,3	20	650	Hoří
29	0,3	20	630	Hoří
30	0,3	20	610	Hoří
31	0,3	20	590	Hoří
32	0,3	20	570	Hoří
33	0,3	20	550	Hoří
34	0,3	20	530	Hoří
35	0,3	20	510	Hoří
36	0,3	20	490	Hoří
37	0,3	20	470	Hoří
38	0,3	20	450	Hoří
39	0,3	20	430	Hoří
40	0,3	20	410	Hoří
41	0,3	20	400	Hoří
42	0,3	20	390	Hoří
43-52	0,3	20	370	Negativní
53	0,4	10	350	Negativní
54	0,2	20	350	Negativní
52	0,3	10	350	Negativní

Minimální teplota vznícení rozviřeného prachu je 370°C.

7 Měření na modifikovaném přístroji

U tohoto modifikovaného zařízení je část rozvířovacího zařízení shodná se zařízením zkonstruovaným dle normy[3]. To umožňuje tak, jako u normovaného postupu měnit množství prachu a rozvířovací tlak a přiblížit se optimálním podmínkám pro vznícení prachu. Navíc při použitém způsobu přivádění prachu do pece je pravděpodobné, že se bude prach v prostoru pece vyskytovat delší dobu a bude déle tepelně namáhán. U tohoto způsobu měření by mělo dojít k naměření nižších hodnot minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu.

7.1 Vzorek číslo 1 Novopassit

Podmínky, kdy bylo pozorováno nejintenzivnější vznícení byly u tohoto vzorku při navážce 0,2 g a při rozvířovacím tlaku 20 kPa. S těmito podmínkami byla provedeno měření na modifikovaném přístroji. Při teplotě 310 °C docházelo ke vznícení slabé intenzity viz tabulka 13, které použitá fotodioda nezaregistrovala a nemohla být vyhodnocena indukční doba vznícení.

Tabulka 13: Měření na modifikovaném zařízení, vzorek Novopassit.

Číslo měření	Teplota prostředí	Indukční doba vznícení	Číslo měření	Teplota prostředí	Indukční doba vznícení
	t [°C]	τ [s]		t [°C]	τ [s]
1	700	0,075	13	460	0,116
2	680	0,076	14	440	0,137
3	660	0,077	15	420	0,162
4	640	0,081	16	400	0,19
5	620	0,083	17	380	0,255
6	600	0,083	18	360	0,311
7	580	0,088	19	350	0,347
8	560	0,092	20	340	0,422
9	540	0,093	21	330	0,609
10	520	0,095	22	320	0,712
11	500	0,101	23	310	Hoří
12	480	0,102	24	300	Negativní

Minimální teplota vznícení rozvířeného prachu je 310 °C. Indukční doba vznícení je větší než 0,712 s.

7.2 Vzorek číslo 2 Natur Carob

Nejintenzivnější vznícení bylo pozorováno při navážce 0,2 g a rozvířovacím tlaku 50 kPa a s těmito hodnotami tlaku a hmotnosti bylo provedeno měření. Při teplotách 410 °C a 400 °C neměl vzniklý plamen takovou intenzitu, při které by došlo k jeho zaregistrování fotodiodou a k následnému určení indukční doby vznícení viz tabulka 14.

Tabulka 14: Měření na modifikovaném zařízení, vzorek Natur Carob.

Číslo měření	Teplota prostředí	Indukční doba vznícení	Číslo měření	Teplota prostředí	Indukční doba vznícení
	t [°C]	τ [s]		t [°C]	τ [s]
1	700	0,107	11	500	0,515
2	680	0,118	12	480	0,8
3	660	0,142	13	460	1,012
4	640	0,165	14	440	1,263
5	620	0,21	15	430	1,462
6	600	0,24	16	420	1,611
7	580	0,26	17	410	Hoří
8	560	0,28	18	400	Hoří
9	540	0,302	19	390	Negativní
10	520	0,383	20	380	Negativní

Minimální teplota vznícení rozvířeného prachu je 400 °C. Indukční doba vznícení je větší než 1,611 s.

7.3 Vzorek číslo 3 Wheat bran extract

Pro tento vzorek bylo nejintenzivnější vznícení pozorováno při navážce 0,3 g a při rozvířovacím tlaku 20 kPa, měření tedy probíhalo při těchto podmínkách. Při teplotě 340 °C nebyla vlivem malé intenzity plamene určena indukční doba vznícení viz tabulka 15.

Tabulka 15: Měření na modifikovaném zařízení, vzorek Wheat bran extract.

Číslo měření	Teplota prostředí	Indukční doba vznícení	Číslo měření	Teplota prostředí	Indukční doba vznícení
	t [°C]	τ [s]		t [°C]	τ [s]
1	700	0,098	14	440	0,578
2	680	0,105	15	430	0,618
3	660	0,105	16	420	0,764
4	640	0,107	17	410	0,836
5	620	0,12	18	400	0,876
6	600	0,123	19	390	0,9
7	580	0,138	20	380	1,141
8	560	0,165	21	370	1,181
9	540	0,218	22	360	1,351
10	520	0,263	23	350	1,415
11	500	0,293	24	340	Hoří
12	480	0,36	25	330	Negativní
13	460	0,473	26	320	Negativní

Minimální teplota vznícení prachu v rozvířeném stavu je 340 °C. Indukční doba vznícení je větší než 1,415 s.

7.4 Zpracování výsledků měření modifikovanou metodou

Vznícení disperzních hořlavých prachů ve vzduchu je velice složitý děj a získané výsledky při stanovování indukční doby vznícení mají určitý rozptyl. K přesnému vyhodnocení výsledků je nutno použít statistické zpracování, nejvhodnější je použití metody nejmenších čtverců. [4,17]

Zpracování výsledků tímto způsobem umožňuje posoudit, jakým způsobem měření probíhalo a zda se naměřené výsledky blíží přímkové závislosti doby vznícení na dané teplotě. Navíc toto zpracování umožňuje vypočítat aktivační energii, což je množství energie, které je zapotřebí, aby 1 mol určité látky přešel ze stavu neaktivního do stavu aktivního, kdy látka snadno spontánně vstupuje do reakce. Což je užitečné při konečném hodnocení prachu. Aktivační energie je pro každou reakci individuální a je nutné ji určit z experimentálních dat. Forma rovnice (9.1) nese název Arrheinova rovnice. Veličina C je frekvenční faktor, pro některé reakce mezi strukturně jednoduchými částicemi může být

vypočten z kinetické teorie plynů jako počet srážek mezi částicemi za časovou jednotku. Exponenciální člen v (9.1) má označení Boltzmanův faktor a jeho hodnoty jsou v mezích (0;1). Faktor se interpretuje jako pravděpodobnost, že reagující částice mají energii alespoň rovnou nebo větší než aktivační energie. [9]

Neměřené hodnoty zejména za nižších teplot vyhovují vztahu (9.1), který vyjadřuje závislost indukční doby vznícení na dané teplotě: [17]

$$\tau = C \cdot e^{\frac{E}{R \cdot T}} \quad [\text{ms}] \quad (9.1)$$

Převedením této rovnice do logaritmického tvaru lze získat přímkovou závislost mezi $\log \tau$ a T^{-1} [4]:

$$\log \tau = A + B \cdot T^{-1} \quad (9.2)$$

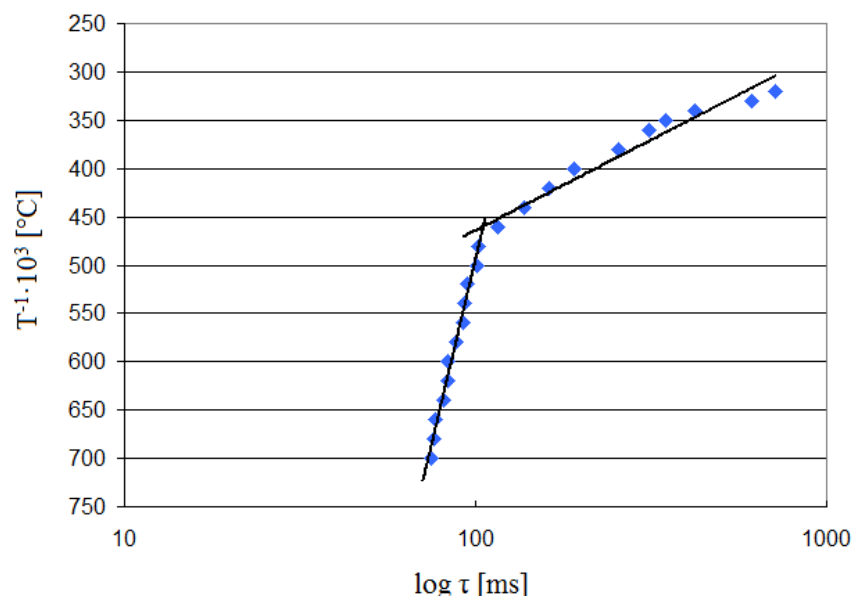
kde

- C ... konstanta závislá na povaze reakce,
- A ... konstanta pro měřený vzorek,
- B ... konstanta pro danou látku $\left(B = \frac{E}{2,3 \cdot R} \right)$,
- E ... aktivační energie procesu [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
- R ... plynová konstanta [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
- T ... absolutní hodnota teploty vznícení [K].

7.4.1 Vzorek číslo 1 Novopassit

V oblasti vysokých teplot se fyzikálně-chemický proces spalování měřeného vzorku prachu neřídí zcela zákony chemické kinetiky a hodnoty měření v této oblasti se vlivem tepelné difuze odchylují od přímkové závislosti. [17]

Naměřené hodnoty vzorku Novopassit byly graficky zpracovány na obrázku 18. Pro vodorovnou osu bylo zvoleno logaritmické měřítko a to pro vhodnější znázornění odklonu naměřených hodnot od přímkové závislosti v oblasti vysokých teplot. U tohoto vzorku je vidět, že k odklonu od přímkové závislosti dochází při teplotě 460 °C. Nad touto teplotou se proces spalování vzorku neřídí zcela zákony chemické kinetiky. Proto se dále tyto hodnoty nad 460 °C nezahrnují do zpracování výsledků statistickou metodou nejmenších čtverců a do výpočtu aktivační energie.



Obrázek 18: Grafické zpracování měření vzorku Novopassit.

Nejpřesnější způsob zpracování naměřených hodnot statistickou metodou je pomocí nejmenších čtverců. Vychází ze skutečnosti, že nejpravděpodobnější hodnoty konstant rovnic jsou ty, pro něž je součet čtverců odchylek vypočtených hodnot od naměřených minimální. Rozdíl naměřených a vypočtených hodnot vyjádříme pomocí rovnice (9.3), která má tvar [4,17]:

$$\varepsilon_i = A + B \cdot x_i - y_i \quad (9.3)$$

kde

A, B ... jsou konstanty,

x_i ... funkce teploty pece ve tvaru $x_i = \frac{1}{(t + 273,15)}$ [K⁻¹],

y_i ... logaritmus hodnoty indukční doby vznícení.

Součet čtverců těchto odchylek pro n měření je:

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (A + Bx_i - y_i)^2 \quad (9.4)$$

Má-li být tento součet minimální, musí se jeho první parciální derivace podle všech proměnných rovnat nule. Proměnnými jsou hodnoty A,B [17]:

$$\frac{\partial \sum \varepsilon^2}{\partial A} = \sum 2 \cdot (A + B \cdot x_i - y_i) = 0 \quad (9.5)$$

$$\frac{\partial \sum \varepsilon^2}{\partial B} = \sum 2 \cdot (A + B \cdot x_i - y_i) \cdot x_i = 0 \quad (9.6)$$

Úpravou těchto rovnic lze získat výrazy A,B [17]:

$$A = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum (x_i \cdot y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (9.7)$$

$$B = \frac{n \sum (x_i \cdot y_i) - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (9.8)$$

Nejvhodnější způsob zpracování je pomocí tabulky.

Tabulka 16: Vypočtené hodnoty pro výpočet lineární regrese a aktivační energie vzorku Novopassit.

n	Teplota t [°C]	Indukční doba τ [ms]	X _i T ⁻¹ [K ⁻¹]	Y _i log τ	X _i ·Y _i	X _i ²
1	480	102	1,3278·10 ⁻³	2,0086	2,6669·10 ⁻³	1,7629·10 ⁻⁶
2	460	116	1,3640·10 ⁻³	2,0645	2,8159·10 ⁻³	1,8604·10 ⁻⁶
3	440	137	1,4022·10 ⁻³	2,1367	2,9962·10 ⁻³	1,9662·10 ⁻⁶
4	420	162	1,4427·10 ⁻³	2,2095	3,1876·10 ⁻³	2,0814·10 ⁻⁶
5	400	190	1,4856·10 ⁻³	2,2788	3,3852·10 ⁻³	2,2069·10 ⁻⁶
6	380	255	1,5310·10 ⁻³	2,4065	3,6845·10 ⁻³	2,3441·10 ⁻⁶
7	360	311	1,5794·10 ⁻³	2,4928	3,9371·10 ⁻³	2,4945·10 ⁻⁶
8	350	347	1,6048·10 ⁻³	2,5403	4,0766·10 ⁻³	2,5752·10 ⁻⁶
9	340	422	1,6309·10 ⁻³	2,6253	4,2817·10 ⁻³	2,6599·10 ⁻⁶
10	330	609	1,6580·10 ⁻³	2,7846	4,6168·10 ⁻³	2,7488·10 ⁻⁶
11	320	712	1,6859·10 ⁻³	2,8525	4,8090·10 ⁻³	2,8423·10 ⁻⁶
Suma			1,6712·10 ⁻²	2,64·10 ¹	4,0458·10 ⁻²	2,5543·10 ⁻⁵

Využitím hodnot z tabulky 16 a využitím vzorců (9.7) a (9.8) lze vypočítat konstanty A,B následujícím způsobem:

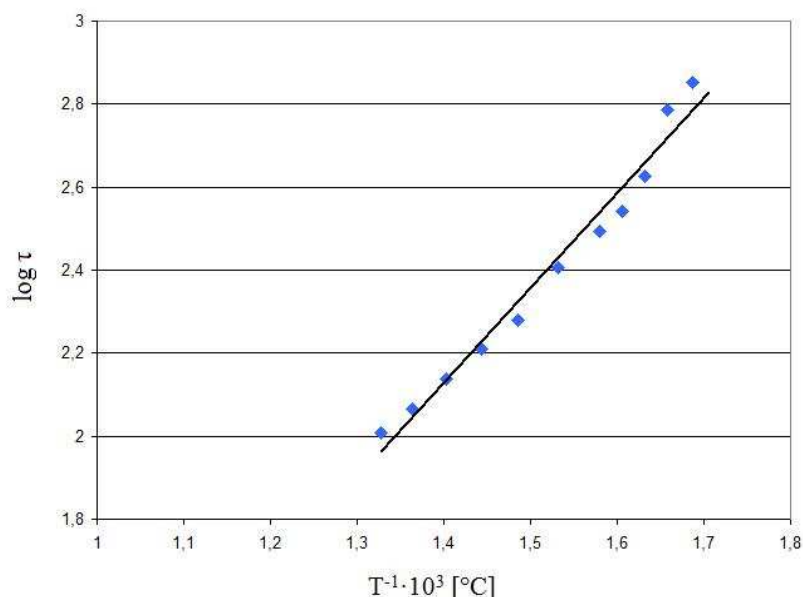
$$A = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum (x_i y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{2,5543 \cdot 10^{-5} \cdot 2,64 \cdot 10^1 - 1,6712 \cdot 10^{-2} \cdot 4,045 \cdot 10^{-2}}{11 \cdot 2,5543 \cdot 10^{-5} - (1,6712 \cdot 10^{-2})^2} = -1,0788$$

$$B = \frac{n \sum (x_i \cdot y_i) - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{11 \cdot 4,0458 \cdot 10^{-2} - 1,6712 \cdot 10^{-2} \cdot 2,64 \cdot 10^1}{11 \cdot 2,5543 \cdot 10^{-5} - (1,6712 \cdot 10^{-2})^2} = 2,2898 \cdot 10^3$$

Rovnice pro naměřené hodnoty vzorku Novopassit má tedy tvar:

$$\log \tau = -1,0788 + 2,2898 \cdot 10^3 \cdot T^{-1} \quad (9.9)$$

Z této rovnice přímky se vychází pro výpočet aktivační energie E_{akt} pro daný vzorek prachu, rovněž se vychází z vypočtené konstanty B. Grafické zpracování rovnice je na obrázku 19. Naměřené hodnoty se blíží lineární závislosti.



Obrázek 19: Grafické vyhodnocení metodou nejmenších čtverců, vzorek Novopassit.

Formální aktivační energie je množství energie, které je zapotřebí, aby 1 mol určité látky přešel ze stavu neaktivního do stavu aktivního, kdy látka snadno vstupuje do reakce. [17]

Aktivační energie se vypočte [17]:

$$\tau = C \cdot e^{\frac{E}{R \cdot T}} \quad [\text{ms}] \quad (9.10)$$

Úpravou lze získat rovnici ve tvaru:

$$E_{akt} = B \cdot 2,303 \cdot R \quad [\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad (9.11)$$

kde

- C ... konstanta závislá na povaze reakce,
- B ... je konstanta,
- R ... plynová konstanta hodnoty $8,315 \text{ [J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$.

Aktivační energie pro vzorek Novopassit se vypočte dle (9.12):

$$E_{akt} = 2,2898 \cdot 10^3 \cdot 2,303 \cdot 8.315 = 41925,39 J \cdot mol^{-1} \quad (9.12)$$

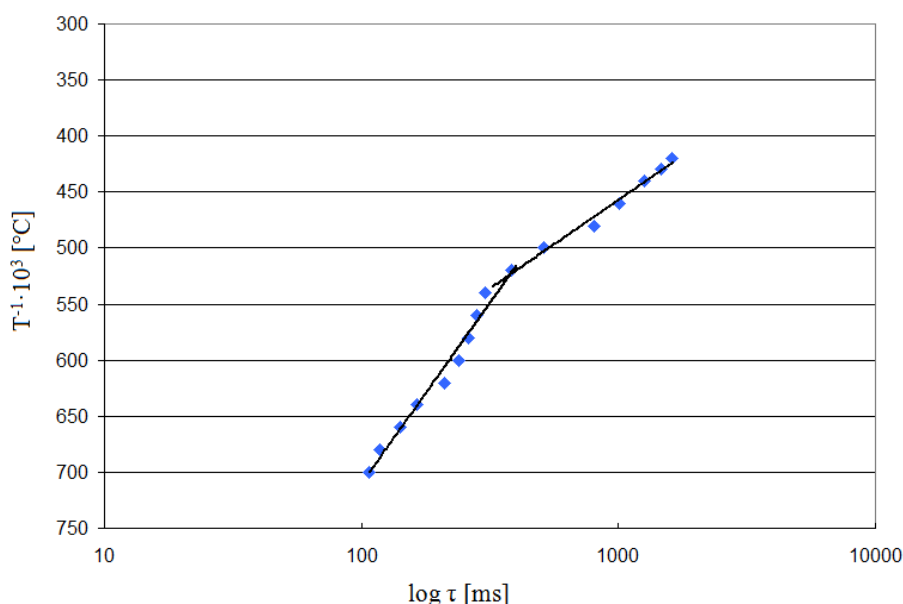
Základní údaje měření vzorku Novopassit tvar regresní funkce, aktivační energie a index korelace jsou shrnuty v tabulce 17.

Tabulka 17: Shrnutí naměřených hodnot vzorku Novopassit.

Minimální teplota vznícení [°C]	310
Indukční doba vznícení [s]	Větší než 0,712
Hodnocení prachu	Velmi vznětlivý prach
Konstanta pro měřený vzorek A	-1,0788
Konstanta pro měřený vzorek B	2,2898
Tvar regresní funkce	$-1,0788 + 2,2898 \cdot 10^3 \cdot T^{-1}$
Aktivační energie [J.mol ⁻¹]	41925
Index korelace	0,9746

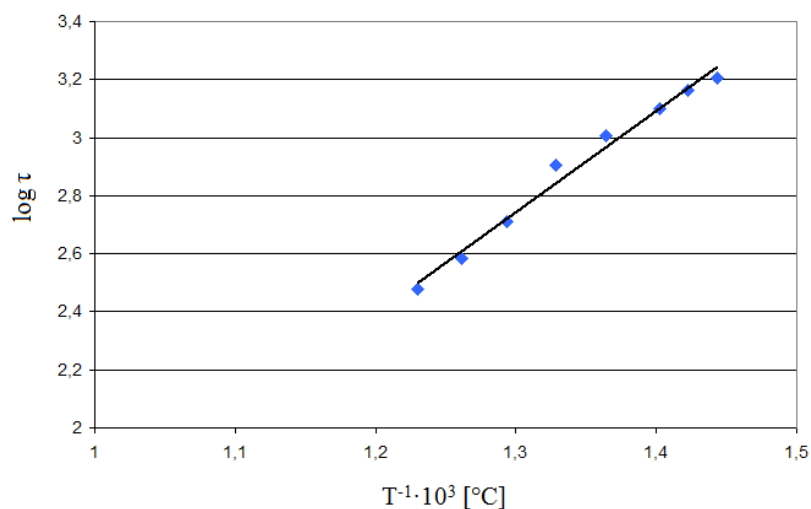
7.4.2 Vzorek číslo 2 Natur Carob

U tohoto vzorku dochází k odklonu od přímkové závislosti při teplotě 540 °C, jak je znázorněno na obrázku 20. Hodnoty na 540 °C nejsou tedy zahrnuty do výpočtu aktivační energie vzorku prachu.



Obrázek 20: Grafické zpracování měření vzorku Natur Carob.

Na obrázku 21 je vidět zpracování naměřených hodnot vzorku Natur Carob od hodnoty 420 až 540 °C. Při srovnání se vzorkem Novopassit, se hodnoty tohoto vzorku blíží přímkové závislosti nepatrně více, což potvrzuje i index korelace v tabulce 18.



Obrázek 21: Grafické vyhodnocení metodou nejmenších čtverců, vzorek Natur Carob.

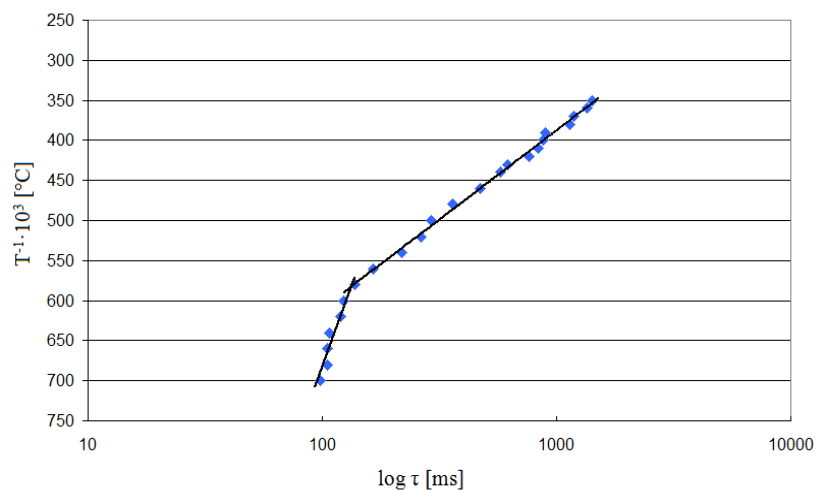
Aktivační energie vzorku, která byla vypočtena má hodnotu 67052 J.mol⁻¹.
Výsledky prachu Natur Carob jsou shrnuty v tabulce 18.

Tabulka 18: Shrnutí naměřených hodnot vzorku Natur Carob.

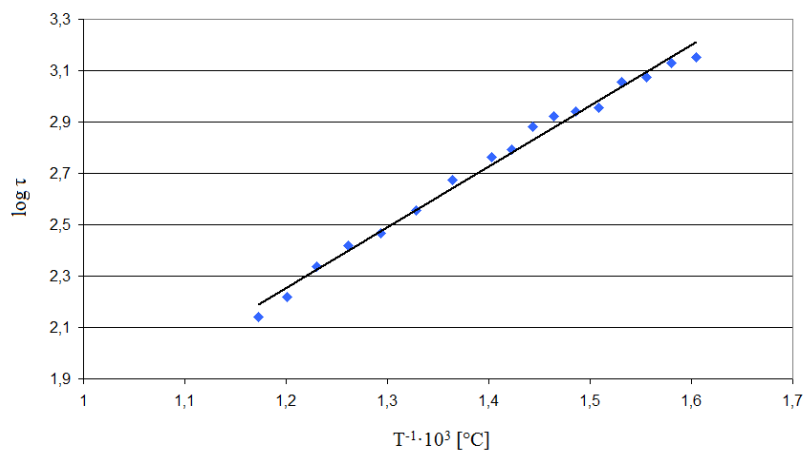
Minimální teplota vznícení [°C]	400
Indukční doba vznícení [s]	Větší než 1,611
Hodnocení prachu	Vznětlivý prach
Konstanta pro měřený vzorek A	-1,8084
Konstanta pro měřený vzorek B	3,5015 · 10 ³
Tvar regresní funkce	-1,8084 + 3,5015 · 10 ³ · T ⁻¹
Aktivační energie [J.mol ⁻¹]	67052
Index korelace	0,9857

7.4.3 Vzorek číslo 3 Wheat bran extract

U tohoto vzorku dochází k odklonu hodnot od přímkové závislosti při teplotě 580 °C, což je možné vidět na obrázku 22. Hodnoty nad 580 °C nejsou zahrnuty do výpočtu aktivační energie vzorku prachu. Naměřené hodnoty se u tohoto vzorku nejvíce blíží přímkové závislosti jak je znázorněno na obrázku 23 a jak potvrzuje i index korelace v tabulce 19.



Obrázek 22: Grafické zpracování měření vzorku Wheat bran extract.



Obrázek 23: Grafické vyhodnocení metodou nejmenších čtverců, vzorek Wheat bran extract.

Výsledná hodnota aktivační energie je 45235 J.mol^{-1} , spolu s ostatními hodnotami je uvedena v tabulce 19.

Tabulka 19: Shrnutí naměřených hodnot vzorku Wheat bran extract.

Minimální teplota vznícení [°C]	340
Indukční doba vznícení [s]	Větší než 1,415
Hodnocení prachu	Velmi vznětlivý prach
Konstanta pro měřený vzorek A	-0,5797
Konstanta pro měřený vzorek B	$2,3622 \cdot 10^3$
Tvar regresní funkce	$-0,5797 + 2,3622 \cdot 10^3 \cdot T^{-1}$
Aktivační energie [J.mol ⁻¹]	45235
Index korelace	0,9896

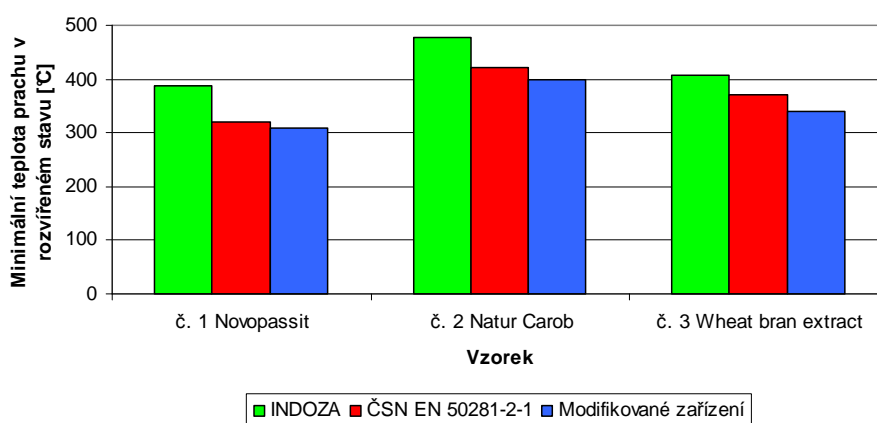
8 Porovnání naměřených hodnot

Pro každý vzorek prachu byly měření na odlišných zařízeních získány tři hodnoty minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu, porovnání těchto hodnot je znázorněno v tabulce 20 a na obrázku 24. Z těchto hodnot vyplývá, že nejvyšší hodnoty byly naměřeny metodou číslo 1, tedy měření na zařízení Indoza. Nejnižší hodnoty byly naměřeny pomocí modifikovaného zařízení.

Tabulka 20: Srovnání výsledků měření.

Druh vzorku	Minimální teplota vznícení [°C]		
	Metoda č. 1	Metoda č. 2	Metoda č. 3
	INDOZA	ČSN EN 50 281-2-1	Modifikovaná
1. Novopassit	387	320	310
2. Natur carob	477	420	400
3. Wheat bran extract	407	370	340

Při srovnání hodnot naměřených na zařízení Indoza a na zařízení dle ČSN EN 50281-2-1 je rozdíl u vzorků Novopassit 67 °C, u vzorku Natur Carob 57 °C a u Wheat bran extract 37 °C, s tím že hodnoty naměřené dle normy jsou nižší. Rozdíl hodnot naměřených na zařízení Indoza a na modifikovaném zařízení je u vzorků Novopassit a Natur Carob 77 °C a u vzorku Wheat bran extract 67 °C. Srovnání metody ČSN EN 50281-2-1 je uvedeno podrobněji níže.



Obrázek 24: Srovnání hodnot měření.

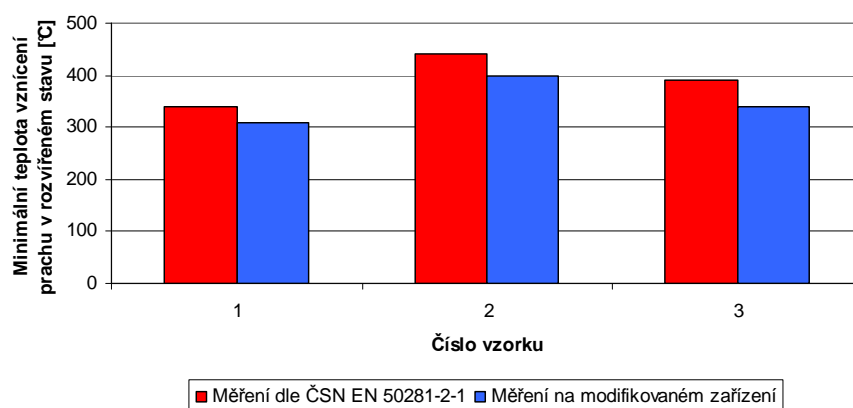
V tabulce 21 je srovnání naměřených hodnot dle normy ČSN EN 50281-2-1 a na modifikovaném zařízení a na obrázku 25 je toto srovnání zpracováno graficky. Toto srovnání je vhodné zejména proto, že u modifikovaného zařízení a původního zařízení jsou

určité shodné konstrukční prvky. Měření vzorku probíhá v peci se stejným objemem a tudíž i se stejným povrchem zahřívání trubice. Rovněž je shodná část rozvířovacího zařízení. Konstrukční rozdíl je zde pouze v konečném způsobu rozvíření prachu do pece viz kapitola 5.3. U jednotlivých vzorků byly použity pro obě metody stejné navážky a stejné rozvířovací tlaky.

Při srovnání hodnot v tabulce 21 vyplývá, že hodnoty naměřené na modifikovaném zařízení jsou nižší než hodnoty naměřené na zařízení zkonstruovaném dle normy [3], rozdíl hodnot je 10 až 30 °C v závislosti na druhu vzorku. Dle normy [3] je výsledná minimální teplota vznícení prachu v rozvířeném stavu definována jako teplota, při níž došlo ke vznícení snižena o 20 °C. Pokud však dojde ke srovnání minimálních teplot, při kterých došlo ke vznícení, pohybuje se tento rozdíl v rozmezí 30 °C až 50 °C v závislosti na druhu vzorku.

Tabulka 21: Srovnání výsledků metody ČSN EN 50281-2-1 a modifikované metody.

Vzorek	Metoda č. 2	Metoda č. 3	Rozdíl [°C]
	ČSN EN 50 281-2-1	Modifikovaná	
	Minimální teplota vznícení rozvířeného prachu [°C]		
Novopassit	320	310	10
Natur Carob	420	400	20
Wheat bran extract	370	340	30
Vzorek	Minimální teplota, při které došlo ke vznícení [°C]		Rozdíl [°C]
Novopassit	340	310	30
Natur Carob	440	400	40
Wheat bran extract	390	340	50

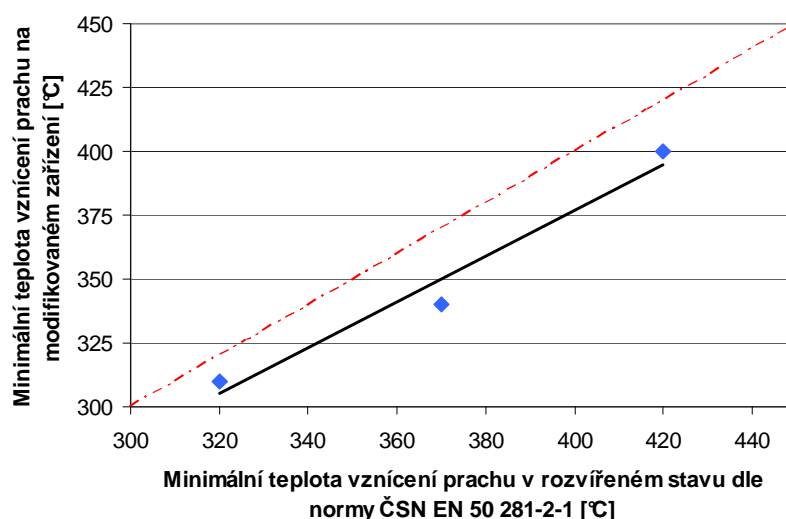


Obrázek 25: Srovnání naměřených hodnot dle ČSN EN 50281-2-1 a na modifikovaném zařízení.

Hodnoty minimálních teplot vznícení prachu v rozvířeném stavu jsou znázorněny na obrázku 26. Vodorovná osa reprezentuje hodnoty naměřené na zařízení dle normy [3], svislá osa hodnoty naměřené na modifikovaném zařízení. Z grafu lze vyčíst, že se naměřené hodnoty blíží lineární závislosti. Tuto závislost lze zapsat jako:

$$y = A + Bx = 17 + 0,9x \quad (12.1)$$

Čerchovaná přímka na obrázku 26 představuje pro srovnání průběh přímky, kdyby došlo k naměření stejných hodnot na obou zařízeních, jak dle normy, tak na modifikovaném zařízení. Koeficienty A a B byly vypočteny pomocí programu Excel s využitím lineární regresní analýzy.



Obrázek 26: Závislost teplot naměřených dle ČSN EN 50281-2-1 a na modifikovaném zařízení.

Index korelace má hodnotu: $I_{yx} = 0,9643$

9 Diskuze výsledků měření

Při srovnání výsledků měření vyplývá, že hodnoty minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu naměřené na zařízení Indoza jsou nejvyšší. To je pravděpodobně způsobeno volbou rozvířovacích podmínek. U této metody je uvedena teoretická možnost volby rozvířovacího tlaku pode natažení pumpičky. Dále se uvádí možnost volby regulovat množství vzorku pomocí hloubky rozvířovací dýzy. Ovšem v praxi se standardně postupuje s objemem rozvířeného vzduchu 5 cm^3 a navážkou $0,25 \text{ g} \pm 0,10 \text{ g}$ dle sypné hustoty vzorku. Nedochozí zde ke změně tlaku a navážky tak, aby došlo k nejintenzivnějšímu vznícení jako u zbylých dvou metod, kde se stanovuje, při jaké navážce a jaké hodnotě rozvířovacího tlaku došlo k nejintenzivnějšímu vznícení vzorku prachu a s těmito hodnotami se dále postupuje při stanovování minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu, jak je popsáno v pracovních postupech viz kapitola 3.2.2 a kapitola 3.3.2. Stanovení, při jakých rozvířovacích podmínkách došlo ke vznícení s nejintenzivnějším plamenem může být do jisté míry subjektivní a závisí na schopnostech a zkušenostech obsluhy zařízení. Což je určitá nevýhoda. Avšak jak vyplývá z výsledků měření, je možné tímto postupem dosáhnout nižších hodnot minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu. Při tomto srovnání jsou rozdíly relativně významné, což naznačuje jakým způsobem ovlivňuje volba navážky a rozvířovacího tlaku minimální teplotu vznícení prachu v rozvířeném stavu. Dále ukazuje, že použití rozvířovacího zařízení dle ČSN EN 50281-2-1 je v porovnání se systémem použitým na zařízení Indoza velmi účinné.

Srovnání hodnot měření na zařízení dle normy [3] a na modifikovaném zařízení ukazuje, že při měření na modifikovaném zařízení lze naměřit nižší hodnoty minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu. Důvodem je odlišný způsob rozvíření vzorku prachu, kdy je prach přiváděn do prostoru pece spodním otvorem a dochází k rozvířování směrem vzhůru. Prach se v peci pohybuje nejprve vzhůru, dochází k jeho rozvíření a následně sedimentuje v závislosti na charakteru prachu, jeho vlastnostech a prostředí ve kterém je rozvířen. Tento způsob rozvíření prachu by měl mít za následek delší dobu výskytu prachu v prostoru pece. Díky tomu dochází k tepelnému namáhání vzorku po delší dobu, oproti postupu dle normy, kdy prach vstupuje do prostoru pece horním otvorem a při pohybu dolů dochází k jeho rozvíření a následné sedimentaci.

Výsledky měření potvrzují teoretické předpoklady, kdy bylo očekáváno, že s delší dobou namáhání vzorku prachu dojde ke vznícení při nižších teplotách. Rozdíl teplot je v rozsahu $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ až $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ podle druhu vzorku, pokud se srovnávají minimální teploty

při kterých došlo ke vznícení vzorku. Avšak dle normovaného postupu [3] je minimální teplota vznícení prachu v rozvířeném stavu teplota, při které došlo ke vznícení snižená o 20 °C. I při srovnání výsledné hodnoty minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu dle normy [3] s hodnotou minimální teploty kdy došlo ke vznícení na modifikovaném zařízení, jsou hodnoty u modifikovaného zařízení nižší. U vzorku číslo 1 se jedná o relativně malý rozdíl 10 °C, to lze vysvětlit relativně nízkou hodnotou vypočtené aktivační energie, což je množství energie potřebné, aby 1 mol určité látky přešel ze stavu neaktivního do stavu aktivního, kdy látka snadno spontánně vstupuje do reakce. Dále je velikost částic tohoto vzorku relativně malá a umožňuje i při nevýhodnějším způsobu rozvíření do pece, aby prach zůstal dlouhou dobu ve vznosu a tudíž jeho delší tepelné namáhání. U vzorku číslo 2 je rozdíl 20 °C a u třetího vzorku 30 °C.

Modifikované zařízení se tedy dá zhodnotit jako přísnější, než zařízení s původním způsobem rozvířování. Pomocí naměřených hodnot se potvrdily teoretický předpoklady, že způsob namáhání vzorku má vliv na stanovení minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu.

10 Závěr

Cílem diplomové práce bylo stanovit vliv způsobu namáhání vzorku prachu na minimální teplotu vznícení v rozvířeném stavu. Pro měření bylo použito modifikované zařízení, jehož konstrukční návrh a modifikace byla předmětem bakalářské práce, na kterou tato diplomová práce navazuje.

V kapitole 2 je uvedeno při jakých činnostech a ve kterých průmyslových odvětvích se nejčastěji vyskytují požáry a výbuchy prachu, je zde popsán mechanismus výbuchu prachu a podmínky potřebné pro výbuch prachu. Dále jsou zde popsány požárně technické charakteristiky a faktory ovlivňující výbušnost prachu.

V kapitole 3 je uveden popis měřících metod ke stanovení minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu. Jsou zde popsány tři zřízení. Zařízení Indoza používané zkušebnou výbušnosti hořlavých prachů, zařízení dle normy ČSN EN 50281-2-1 a zařízení dle této normy po provedené modifikaci. Je zde popsáno konstrukční řešení zařízení, pracovní postup a jakým způsobem dochází k vyhodnocování měření. Dále jsou popsány vzorky hořlavých prachů, tyto vzorky byly vybrány ve spolupráci s akreditovanou zkušební laboratoří VVUÚ a.s. Ostrava Radvanice, u těchto vzorků je uveden síťový rozbor.

Hlavní část tvoří výsledky měření jednotlivých metod. Jsou zde uvedeny výsledky provedeného měření na zařízení Indoza používaném ve zkušební laboratoři VVUÚ a.s. Dále jsou zde výsledky měření dle ČSN EN 50281-2-1 a výsledky měření provedeného na modifikovaném zařízení. Výsledky měření byly zpracovány pomocí metody nejmenších čtverců a pro dané vzorky byla vypočtena aktivační energie.

Při porovnání výsledků měření minimálních teplot vznícení prachu v rozvířeném stavu na třech zařízeních lze konstatovat, že nejnižší teploty byly získány na modifikovaném zařízení. Potvrdil se tedy předpoklad že při změně způsobu rozvířování prachu do pece a s tím související změnou způsobu namáhání vzorku prachu dojde ke vznícení při nižších teplotách. Z toho vyplývá, že způsob namáhání vzorku má vliv na stanovování minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu.

Tato práce ukazuje, jak lze jednoduchou úpravou měřící aparatury dosáhnout při měření nižších hodnot minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu. Práce zároveň dokládá, že hodnoty stanovené měřením na zařízení dle ČSN EN 50 281-2-1 musí být brány s určitou mírou obezřetnosti a že může docházet ke vznícení prachu při teplotách nižších, než stanovených touto metodou.

11 Použitá literatura:

- [1] BARTLOVÁ, I., DAMEC, J. *Prevence technologických zařízení*. 1. vydání, Ostrava SPBI, 2002. ISBN 80-86634-10-8.
- [2] BURIAN, S. Výbušnost hořlavých prachů. *150 Hoří*. [online]. 1998, č. 10. [cit. 2010-1-31]. Dostupné z <<http://www.mvcr.cz/casopisy/150hori.html>>.
- [3] ČSN EN 50281.: *Elektrická zařízení pro prostory s hořlavým prachem*. Metody zkoušek část 2-1. Praha: Český normalizační institut. 1999.
- [4] DAMEC, J., FIONOK, R., HANUŠ, A. *Protivýbuchová prevence (návod na cvičení)*. 1. vydání, Ostrava: VŠB Ostrava, 1993. ISBN 80-7078-191-2.
- [5] DAMEC, J. *Protivýbuchová prevence*. 1. vydání, Ostrava: SPBI, 2005. ISBN 80-86111-21-0.
- [6] DAMEC, J. *Protivýbuchová prevence*. 1. vydání, Ostrava: VŠB Ostrava, 1993. ISBN 80-7078-190-4.
- [7] ECKHOFF, R. K. *Identification, Assessment and Control of Dust Hazards*. 3rd ed. Burlington : Gulf Professional Publishing, 2003. 719 s. Dostupné z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>. ISBN 0-7506-7602-7.
- [8] BUSCHART, R.J. Dust explosions in process plants. *Industry Applications Magazine, IEEE* [online]. 1999, Volume: 5, Issue:1 , [cit. 2010-01-08]. Dostupný z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org>>. ISSN 1077-2618.
- [9] KALOUSEK, J. *Základy fyzikální chemie hoření, výbuchu a hašení*. 2. vydání, Ostrava: SPBI, 1999. 203 s. ISBN 80-86111-34-2.
- [10] Kolektiv autorů.: *Protivýbuchová prevence v potravinářství a zemědělství*. Ostrava: SPBI, 1999. ISBN 80-86111-41-5.
- [11] AMYOTTE, P. R., et al. *Moderation of dust explosions*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries [online]. November 2007, 20, [cit. 2010-01-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
- [12] ABBASI, T.; ABBASI, S. A. *Dust explosions—Cases, causes, consequences, and control*. Journal of Hazardous Materials [online]. 9 February 2007, 2, [cit. 2010-01-06]. Dostupný z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.

- [13] KOŘÍNEK, K. *Požárně technické charakteristiky prachu a jejich význam v technické praxi*. CHEMagazín [online]. 2006, 16, 6, [cit. 2010-01-04]. Dostupný z WWW: <http://www.chemmagazin.cz/Texty/CHXVI_6_cl1.pdf>.
- [14] DAMEC, J., ŠIMANDL, L. *Laboratorní praktikum protivýbuchové prevence technologických procesů*. 1. vydání. Ostrava : SPBI, 2005. 37 s. 80-86634-57-4.
- [15] FILIPI, B. *Nauka o materiálu*. 1. vydání. Ostrava : SPBI, 2003. 124 s. ISBN 80-86634-11-6.
- [16] BARTON, J. *Dust explosion prevention and protection*. Rugby : Institution of Chemical Engineers, 2002. 352 s. ISBN 0-7506-7519-5.
- [17] DAMEC, J; CHOLEVA, L. *Laboratorní praktikum protivýbuchové prevence technologických procesů*. Praha : Učební text MV ČSSR, 1980. 71 s.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Vliv vlhkosti na hodnotu minimální iniciační energie[7]	13
Obrázek 2: Vliv vlhkosti na maximální rychlost narůstání výbuchového tlaku. [7]	13
Obrázek 3: Výbuchová charakteristika hořlavého prachu se vzduchem. [7].....	14
Obrázek 4: Závislost maximální rychlosti narůstání výbuchového tlaku na měrném povrchu. [7].....	16
Obrázek 5: Vliv obsahu koncentrace kyslíku na výbuchové parametry. [7]	17
Obrázek 6: Vliv koncentrace kyslíku na hodnoty minimální iniciační energie. [7]	17
Obrázek 7: Vliv teploty na minimální iniciační energii. [7].....	18
Obrázek 8: Vliv turbulence v okamžiku iniciace na výbuchové parametry. [7]	19
Obrázek 9: Schematické zobrazení měřicího zařízení.	22
Obrázek 10: Schematické zobrazení měřicího zařízení.	25
Obrázek 11: Rozvířovací aparatura.	26
Obrázek 12: Způsob rozvířování prachu - vlevo původní způsob, vpravo po úpravě.	27
Obrázek 13: Sestava upraveného zařízení.	28
Obrázek 14: Schéma zapojení relé a fotodiody na svorkovnici.....	29
Obrázek 15: Grafický výstup síťového rozboru vzorku Novopassit.	33
Obrázek 16: Grafický výstup síťového rozboru vzorku Natur Carob.	34
Obrázek 17: Grafický výstup síťového rozboru vzorku Wheat bran extract.....	35
Obrázek 18: Grafické zpracování měření vzorku Novopassit.	48
Obrázek 19: Grafické vyhodnocení metodou nejmenších čtverců, vzorek Novopassit.	50
Obrázek 20: Grafické zpracování měření vzorku Natur Carob.	51
Obrázek 21:Grafické vyhodnocení metodou nejmenších čtverců, vzorek Natur Carob.	52
Obrázek 22: Grafické zpracování měření vzorku Wheat bran extract.....	53
Obrázek 23: Grafické vyhodnocení metodou nejmenších čtverců, vzorek Wheat bran extract.	53
Obrázek 24: Srovnání hodnot měření.	54
Obrázek 25: Srovnání naměřených hodnot dle ČSN EN 50281-2-1 a na modifikovaném zařízení.	56
Obrázek 26: Závislost teplot naměřených dle ČSN EN 50281-2-1 a na modifikovaném zařízení.	56
Obrázek 27 Měřicí zařízení dle ČSN EN 50281-2-1	Příloha 1
Obrázek 28: Detail skleněného adaptéru a zásobníku na prach.....	Příloha 1
Obrázek 29: Měřicí zařízení po modifikaci.	Příloha 2
Obrázek 30: Detail zásobníku, silikonové spojky a rozvířovacího potrubí.	Příloha 2
Obrázek 31: Znázornění připojení rozvířovacího potrubí na zásobník prachu.	Příloha 2
Obrázek 32: Fotografie pracovního místa pro měření.	Příloha 2
Obrázek 33: Detail umístění fotodiody.....	Příloha 2
Obrázek 34: Znázornění umístění fotodiody.	Příloha 2
Obrázek 35: Základní menu měřicího programu.	Příloha 3
Obrázek 36: Nastavení parametrů měření.....	Příloha 3
Obrázek 37: Nastavení spouštění měření.....	Příloha 3
Obrázek 38: Označení kanálů před měřením.....	Příloha 3
Obrázek 39: Naměřené hodnoty v programu excel.	Příloha 3
Obrázek 40: Grafický výstup z měření indukční doby vznícení.....	Příloha 3

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení hořlavých prachů podle hodnot kubické konstanty.	10
Tabulka 2: Hodnocení měření.....	31
Tabulka 3: Vzorky prachu.	32
Tabulka 4: Stanovení zrnitosti pro vzorek Novopassit.	32
Tabulka 5: Stanovení zrnitosti pro vzorek Natur Carob.	33
Tabulka 6: Stanovení zrnitosti pro vzorek Wheat bran extrakt.	34
Tabulka 7: Stanovení minimální teploty vznícení rozvířeného prachu, vzorek Novopassit. ..	36
Tabulka 8: Stanovení minimální teploty vznícení rozvířeného prachu, vzorek Natur Carob.	38
Tabulka 9: Stanovení minimální teploty vznícení rozvířeného prachu, vzorek Wheat bran extract.....	39
Tabulka 10: Měření dle ČSN EN 50 281-2-1 vzorek Novopassit.	40
Tabulka 11: Měření dle ČSN EN 50 281-2-1 vzorek Natur Carob.	41
Tabulka 12: Měření dle ČSN EN 50 281-2-1, vzorek Wheat bran extract.....	42
Tabulka 13: Měření na modifikovaném zařízení, vzorek Novopassit.	44
Tabulka 14: Měření na modifikovaném zařízení, vzorek Natur Carob.	45
Tabulka 15: Měření na modifikovaném zařízení, vzorek Wheat bran extract.....	46
Tabulka 16: Vypočtené hodnoty pro výpočet lineární regrese a aktivační energie vzorku Novopassit.....	49
Tabulka 17: Shrnutí naměřených hodnot vzorku Novopassit.....	51
Tabulka 18: Shrnutí naměřených hodnot vzorku Natur Carob.	52
Tabulka 19: Shrnutí naměřených hodnot vzorku Wheat bran extract.	53
Tabulka 20: Srovnání výsledků měření.	54
Tabulka 21: Srovnání výsledků metody ČSN EN 50281-2-1 a modifikované metody.....	55
Tabulka 22: Zpracování hodnot pro výpočet standardní odchylky. Příloha 4	

Seznam zkratek

LEL – Dolní mez výbušnosti (lower explosion limit)

UEL – Horní mez výbušnosti (upper explosion limit)

K_{St} – Kubická konstanta

Seznam příloh

Příloha 1: Fotografie měřicího zařízení dle ČSN EN 50281-2-1.

Příloha 2: Zobrazení modifikovaného měřicího zařízení.

Příloha 3: Nastavení hodnot pro měření indukční doby vznícení pomocí měřicí karty.

Příloha 4: Nejistota měření indukční doby vznícení modifikovaného zařízení.

Příloha 5: Nejistota měření minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu.

Příloha 1: Fotografie měřicího zařízení dle ČSN EN 50281-2-1.



Obrázek 27 Měřicí zařízení dle ČSN EN 50281-2-1



Obrázek 28: Detail skleněného adaptéru a zásobníku na prach.

Roman Kaperstein. Stanovení minimální teploty vznícení v rozvířeném stavu u vybraných prachů na modifikovaném přístroji.

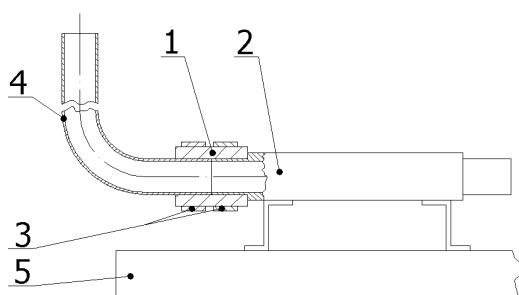
Příloha 2: Zobrazení modifikovaného měřicího zařízení.



Obrázek 29: Měřicí zařízení po modifikaci.



Obrázek 30: Detail zásobníku, silikonové spojky a rozvířovacího potrubí.



Obrázek 31: Znázornění připojení rozvířovacího potrubí na zásobník prachu.

Popis obrázku 5:

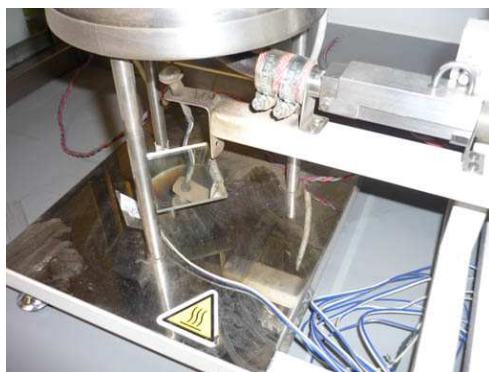
1 – Silikonová spojka, 2 – Zásobník na prach, 3 – Utahovací spona, 4 – Trubka pro přívod prachu, 5 – Nosná konstrukce

Roman Kaperstein. Stanovení minimální teploty vznícení v rozvířeném stavu u vybraných prachů na modifikovaném přístroji.

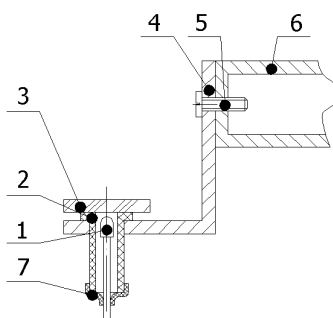
Příloha 2: Zobrazení modifikovaného měřicího zařízení.



Obrázek 32: Fotografie pracovního místa pro měření.



Obrázek 33: Detail umístění fotodiody.



Obrázek 34: Znázornění umístění fotodiody.

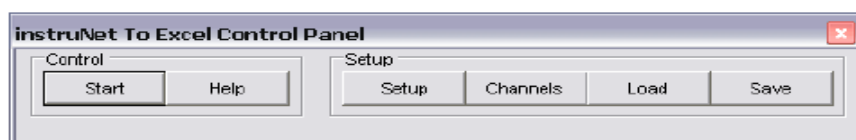
Popis obrázku 6:

1 – Fotodioda, 2 – Plastové pouzdro, 3 – Skleněný kryt, 4 – Držák, 5 – Šroub M3, 6 – Nosná konstrukce, 7 – Izolace

Roman Kaperstein. Stanovení minimální teploty vznícení v rozvířeném stavu u vybraných prachů na modifikovaném přístroji.

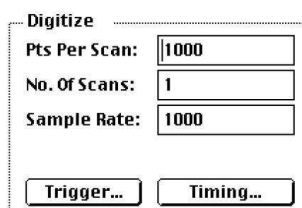
Příloha 3: Nastavení hodnot pro měření indukční doby vznícení pomocí měřicí karty.

Spolu s měřicí kartou je dodáván software, který umožňuje nastavit různé parametry měření a vyhodnotit naměřené hodnoty. Pro měření indukční doby vznícení je využíván program Direkt to Excel. Po zapnutí počítače je možné program spustit v systému Windows přes nabídku Start / Programy / instruNet / Application Software / Direct To Excel / Direct To Excel.exe. Po zapnutí programu se zobrazí základní okno viz obrázek 35. Pro nastavení potřebných hodnot pro měření je zde tlačítko „setup“. Tlačítko „channels“ slouží k zobrazení měřících kanálů, k jejich bližšímu nastavení a umožňuje další funkce. Pomocí tlačítek „load“ a „save“ lze načíst a ukládat nastavení měřicí karty.



Obrázek 35: Základní menu měřícího programu.

V nabídce „setup“, jak je znázorněno na obrázku 36 jsou položky „Pts Per Scan“, „No. Of Scan“ a „Sample Rate“. „Pts Per Scan“ určuje množství dat, která mají být sebrána při každém skenování. Díky „Pts Per Scan“ lze v závislosti na hodnotě „Sample Rate“ nastavit interval, po který bude měření probíhat. No. Of Scan umožňuje nastavit počet měření, které po startu proběhnou. Sample Rate určuje rychlost vzorkování za sekundu. Pro měření v intervalu jedné sekundy a s přesností na tisícinu sekundy je potřeba nastavit hodnoty jako na obrázku 36.



Obrázek 36: Nastavení parametrů měření.

Pomocí nabídky „trigger“ na obrázku 37 lze nastavit kdy dojde ke spuštění měření. V poli „trigger“ je potřeba nastavit hodnotu „norm“, pokud je v poli „trigger“ hodnota „off“, měření začíná bezprostředně po stisku tlačítka „start“ v základní nabídce.

Roman Kaperstein. Stanovení minimální teploty vznícení v rozvřeném stavu u vybraných prachů na modifikovaném přístroji.

Příloha 3: Nastavení hodnot pro měření indukční doby vznícení pomocí měřicí karty.

Při hodnotě auto program vyčkává dokud nedojde ke splnění nastavených kritérií ke spuštění měření, avšak pokud nedojde ke splnění podmínek do jedné sekundy, měření začne po tomto čase automaticky. Při zadání hodnoty „norm“ bude program čekat na splnění kritérií neomezeně dlouho.

Settings: **Trigger**

<input checked="" type="checkbox"/> Off	Trigger	Off	Trig. Net#:	1
<input type="checkbox"/> Auto	Threshold EU:	1.5	Trig. Dev#:	1
<input type="checkbox"/> Norm	Slope:	Rising	Trig. Mod#:	1
<input checked="" type="checkbox"/> Rising	PreTrigger:	0	Trig. Chan#:	1
<input type="checkbox"/> Falling				

Obrázek 37: Nastavení spouštění měření.

Do pole „threshold EU“ je zadána hodnota, při jejíž překročení dojde ke spuštění měření. V poli „slope“ je zadáno, zda dojde ke spuštění při nárůstu hodnoty nebo poklesu (rising, falling). Hodnoty „Trig Net#“, „Trig Dev#“, „Trig Mod#“ and „Trig Chan#“ definují síťovou adresu spouštěcího mechanismu. Pokud by bylo elektromagnetické relé připojeno na kanálu svorkovnice číslo 1, bylo by nastavení adresy spouštěcího mechanismu shodné s obrázkem 37.

V nabídce „channels“ je nutné před začátkem měření nastavit, který kanál bude skenován. Po označení kanálu se červeně zabarví pole za adresou kanálu viz obrázek 38. Při kliknutí na kanál se objeví nabídka, ve které lze nastavovat typ senzoru, citlivost a různé filtry pro měření.

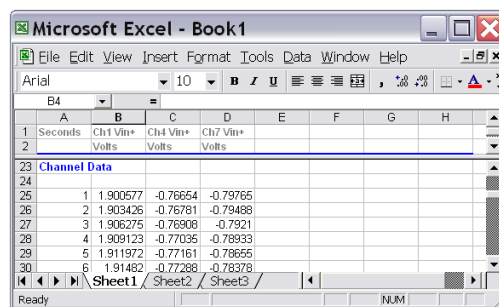
Channel	Addr	Value	Input
Ch1 Uin+	1/1/1	-0.674899	
Ch4 Uin+	1/1/1	-0.000381	

Obrázek 38: Označení kanálů před měřením.

Po stisknutí tlačítka start v základním menu se otevře okno programu Excel a vypíšíou základní hodnoty a charakteristiky měřených kanálů. Program vyčkává dokud nedojde k rozvícení prachu do pece při sepnutí spínače a elektromagnetického relé. Po sepnutí relé dojde ke spuštění měření a vypíšíou se hodnoty na měřených kanálech jako na obrázku 39. Je potřeba najít v jakém čase došlo k nárůstu napětí na kanálu fotodiody, tento čas je indukční doba vznícení. V nabídce „channels“ a záložce rekord je možné vidět grafický výstup z měření viz obrázek 40.

Roman Kaperstein. Stanovení minimální teploty vznícení v rozvíceném stavu u vybraných prachů na modifikovaném přístroji.

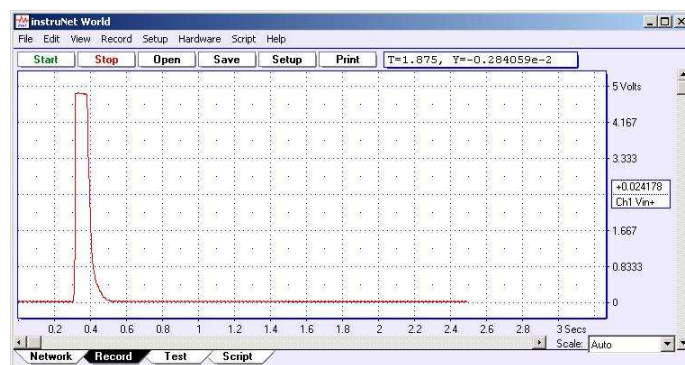
Příloha 3: Nastavení hodnot pro měření indukční doby vznícení pomocí měřicí karty.



The screenshot shows a Microsoft Excel window titled "Microsoft Excel - Book1". The active sheet is "Sheet1". The data is organized into columns: A (Seconds), B (Ch1 Vin+ Volts), C (Ch4 Vin+ Volts), and D (Ch7 Vin+ Volts). The data is as follows:

Seconds	Ch1 Vin+ Volts	Ch4 Vin+ Volts	Ch7 Vin+ Volts
1	1.900577	-0.76654	-0.79765
2	1.903426	-0.76781	-0.79488
3	1.906275	-0.76908	-0.7921
4	1.909123	-0.77035	-0.78933
5	1.911972	-0.77161	-0.78655
6	1.91482	-0.77288	-0.78378

Obrázek 39: Naměřené hodnoty v programu Excel.



Obrázek 40: Grafický výstup z měření indukční doby vznícení.

Roman Kaperstein. Stanovení minimální teploty vznícení v rozvřeném stavu u vybraných prachů na modifikovaném přístroji.

Příloha 4: Nejistota měření indukční doby vznícení modifikovaného zařízení.

Standardní nejistota typu A.

Při teplotě 460 °C byla na modifikovaném zařízení provedena série 20 měření indukční doby vznícení za účelem stanovení standardní nejistoty typu A

Tabulka 22: Zpracování hodnot pro výpočet standardní odchylky.

Číslo měření	τ	$\Delta\tau = \bar{\tau} - \tau$	$(\Delta\tau)^2 = \bar{\tau} - \tau$
	[s]	[10 ⁻³ s]	[10 ⁻⁶ s]
1	0,107	-8,5	72,25
2	0,106	-9,5	90,25
3	0,115	-0,5	2,25
4	0,125	9,5	90,25
5	0,122	6,5	42,25
6	0,115	-0,5	0,25
7	0,125	9,5	90,25
8	0,112	-3,5	12,25
9	0,121	5,5	30,25
10	0,111	-4,5	20,25
11	0,119	3,5	12,25
12	0,105	-10,5	110,25
13	0,122	6,5	42,25
14	0,118	2,5	6,25
15	0,114	-1,5	2,25
16	0,107	-8,5	72,25
17	0,118	2,5	6,25
18	0,111	-4,5	20,25
19	0,123	7,5	56,25
20	0,114	-1,5	2,25
$\sum (\Delta\tau)^2$			779

Průměrná hodnota se vypočte dle vzorce (12.2):

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{n} = 0,1155s \quad (12.2)$$

$$\sum (\Delta\tau)^2 = 779 \cdot 10^{-6} s^2 \quad (12.3)$$

Roman Kaperstein. Stanovení minimální teploty vznícení v rozvířeném stavu u vybraných prachů na modifikovaném přístroji.

Příloha 4: Nejistota měření indukční doby vznícení modifikovaného zařízení.

Protože směrodatná odchylka výběrového průměru je rovna standardní nejistotě typu A, platí dle (12.4):

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{\tau})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta\tau)^2}{20 \cdot 19}} = \sqrt{\frac{779 \cdot 10^{-6}}{380}} = 0,00143s \quad (12.4)$$

Standardní nejistota typu B

- Měřicí okruh – maximální odchylka $z_1 = 0,005$ s;
- Odečet indukční doby vznícení $z_2 = 0,001$ s

Standardní nejistota se určí dle vztahu:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{z_j}{m} \right)^2} \quad (12.5)$$

Je uvažováno rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti, je tedy zvoleno $m = \sqrt{3}$.

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{z_j}{m} \right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,005}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{0,001}{\sqrt{3}} \right)^2} = 0,00294392s \quad (12.6)$$

Kombinovaná standardní nejistota se vypočte dle vztahu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,00143^2 + 0,00294392^2} = 3,273 \cdot 10^{-3} s \quad (12.7)$$

Rozšířená standardní nejistota U se vypočte:

$$U = k_u \cdot u_C = 2 \cdot 3,273 \cdot 10^{-3} = 6,546 \cdot 10^{-3} s \quad (12.8)$$

Po zaokrouhlení: Výsledek měření: $\tau = (0,116 \pm 0,007)$ s.

Relativní nejistota se vypočte dle (12.9):

$$\delta U = \frac{U}{\tau} \cdot 100 = \frac{0,007}{0,116} \cdot 100 \doteq 7\% \quad (12.9)$$

Roman Kaperstein. Stanovení minimální teploty vznícení v rozvířeném stavu u vybraných prachů na modifikovaném přístroji.

Příloha 5: Nejistota měření minimální teploty vznícení prachu v rozvířeném stavu.

Standardní nejistota typu A.

Z naměřených dat určitého počtu měření teploty byly získány hodnoty.

Průměrná teplota: $\bar{t} = 420^\circ\text{C}$

$$\text{Hodnota } \sum_{i=1}^n (\Delta_{t,i})^2 = \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 = 0,6^\circ\text{C} \quad (12.10)$$

Standardní nejistota typu A se vypočte dle (12.11)

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta t)^2}{10 \cdot 9}} = \sqrt{\frac{0,6}{90}} = 0,1^\circ\text{C} \quad (12.11)$$

Standardní nejistota typu B

Barometrický tlak: příspěvek zanedbatelný

Relativní vlhkost vzduchu: příspěvek zanedbatelný

Okolní teplota: příspěvek zanedbatelný

Maximální odchylka měřicího přístroje: $z_1 = 0,2^\circ\text{C}$

Měřicí přístroj – odečet: $z_2 = 0,1^\circ\text{C}$

Termočlánek K1 – kalibrace: $u_1 = 5,0^\circ\text{C}$

Standardní nejistota typu B se vypočte dle (12.12)

$$u_B = \sqrt{\left(\frac{z_1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{z_2}{\sqrt{3}}\right)^2 + u_1^2} = \sqrt{\left(\frac{0,2}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{\sqrt{3}}\right)^2 + 5,0^2} = 5,0^\circ\text{C} \quad (12.12)$$

Kombinovaná standardní nejistota se vypočte dle vztahu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,1^2 + 5^2} = 5,0^\circ\text{C} \quad (12.13)$$

Rozšířená nejistota měření

Koeficient rozšíření $k = 2$

$$U = k_u \cdot u_C = 2 \cdot 5,0 = 10,0^\circ\text{C} \quad (12.14)$$

Výsledek měření : $t = (420,0 \pm 10,0)^\circ\text{C}$.

Roman Kaperstein. Stanovení minimální teploty vznícení v rozvířeném stavu u vybraných prachů na modifikovaném přístroji.